



Eesti Maaülikool
Põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Lisett Lutsberg

**METAANILAGUNDUSKATTE UURING JÕELÄHTME
PRÜGILAS**
**THE STUDY OF METHANE DEGRATATION LAYER AT
JÕELÄHTME LANDFILL**

Magistritöö
Keskkonnakorralduse ja -poliitika õppekava

Juhendaja: professor Mait Kriipsalu, *PhD*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Lisett Lutsberg		Õppekava: Keskkonnakorraldus ja -poliitika	
Pealkiri: Metaanilagunduskatte uuring Jõelähtme prügilas			
Lehekülgi: 60	Jooniseid: 27	Tabeleid: 4	Lisasid: 5
Osakond / Õppetool: Keskkonnakaitse ja maastikukorralduse õppetool			
Teadusvaldkond: Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll (T270)			
Juhendaja(d): prof Mait Kriipsalu			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2021			
<p>Prügilagaas tekib jäätmete lagunemisel ja see koosneb peamiselt metaanist ja süsihappegaasist. Mõlemad on kasvuhoonegaasid ning on kahjulikud nii inimestele kui ka keskkonnale. Prügilatel on kohustus tekkinud gaas koguda, kuid mingi hetk, kui gaasi hulk muutub väikseks, muutub gaasi kogumine majanduslikult ebaefektiivseks. Sellest tulenevalt on prügilasse mõistlik rajada bioaktiivne kiht, kus toimuks metaani lagundamine.</p> <p>Käesoleva magistritöö eesmärk on uurida biokatte tõhusust metaani lagundamisel Jõelähtme prügilas. Katseala on rajatud Jõelähtme prügila ladestusalale, kus jäätmete ladestamine on lõppenud, ja on kaetud biokattega. Töö raames võeti proov kattematerjalist, et määrata kattematerjali ja gaasijaotuskihi materjali omadused. Biokattega alale paigaldati kaks kaheksast mõõtetorust koosnevat gaasiseirekaevu ning seitse mõõterõngast, millest kolm asub biokattega alal ja neli asub avatud prügila pinnal. Kattekihi seest mõõdeti metaani sisaldust gaasianalüsaatoriga GA5000 kohapeal, kattekihiga kaetud ja avatud prügila pinnalt koguti gaasi vakumeeritud pudelitesse, mida hiljem analüüsiti laboris. Väliuuringud toimusid perioodil august.2020 – mai.2021.</p> <p>Biokattesse paigaldatud gaasiseirekaevude mõõtmistulemustest selgus, et metaani esineb kattekihi sees, kuid pinnapealsemates kihtides selle sisaldus väheneb. Biokatte pinnal on metaani sisaldus küllaltki väike võrreldes avatud prügila pinnalt mõõdetud tulemustega.</p>			
Märksõnad: metaani lagunemine, prügilagaas, metaanilagunduskatte, biooksüdatsioon			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master's Thesis	
Author: Lisett Lutsberg		Curriculum: Environmental management and policy	
Title: The study of methane degradation layer at Jõelähtme landfill			
Pages: 60	Figures: 27	Tables:	Appendixes: 5
Department / Chair: Institute of Agricultural and Environment Sciences Field of research and: Environmental technology, pollution control (T270) Supervisors: prof Mait Kriipsalu Place and date: Tartu 2021			
<p>Landfill gas is produced through waste degradation and it is mainly composed of methane and carbon dioxide. Both are greenhouse gases and are harmful to people and the environment. It is mandatory to collect gas generated in landfills, but at some point, when gas production is too low to recover, it becomes economically inefficient. Therefore, it is wise to cover a landfill with a methane degradation layer.</p> <p>The aim of this Master's thesis is to study the efficiency of Jõelähtme landfills' methane degradation layer. The test site was constructed at the top of the landfill and was covered with methane degrading cover layer. During the study, samples were taken from the biocover and gas distribution layer to determine its features. Two gas wells consisting of 8-level horizontal pipes with gas collection filters were installed. Also, seven stationary rings were installed - three rings on top of the cover layer and four rings on top of waste. Methane content inside the cover layer was measured using a portable gas analyser GA5000. Gas was collected from waste and the cover layer by using vacuumed bottles, which were later analysed in the lab. Field work was conducted from August 2020 – May 2021.</p> <p>The results showed that methane is present throughout the entire cover layer, but at the top there is only small amounts of methane present. Methane content on the surface of the biocover is rather small compared to the amount of methane emitted from waste.</p>			
Keywords: methane degradation, landfill gas, methane degradation layer, bio-oxidation			

SISUKORD

SISUKORD	4
SISSEJUHATUS	5
1. TEOREETILINE ÜLEVAADE	7
1.1. Prügilagaas	7
1.2. Prügilagaasi teke	8
1.3. Prügilagaasi kogumine ja käitlemine	9
1.4. Metaanilagunduskate prügila kattekihina	10
1.5. Jäätmealased poliitikad ja strateegiad Euroopa Liidus ja Eestis	13
1.6. Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus	14
2. MATERJAL JA METOODIKA	17
2.1. Katseala	17
2.2. Biokatte materjali iseloomustamine	18
2.3. Gaasikaevude ja rõngaste paigaldamine	19
2.4. Prügilagaasi mõõtmine katseala pinnalt	23
2.5. Prügilagaasi mõõtmine katseala kattekihi seest	26
3. TULEMUSED JA ARUTELU	28
3.1. Biokatte materjali sõelumine ja sortimine	28
3.2. Gaaside sisaldus kattekihi sees	31
3.3. Temperatuur kattekihi sees	36
3.4. Metaani sisaldus kattekihi ja prügila pinnal	39
KOKKUVÕTE	44
SUMMARY	46
KASUTATUD KIRJANDUS	48
LISAD	53
Lisa 1. Kattematerjali ja tuha sõelumise ja sortimise tulemused	54
Lisa 2. Gaasiseirekaevu K1 mõõtmistulemused	55
Lisa 3. Gaasiseirekaevu K2 mõõtmistulemused	56
Lisa 4. Biokattega alalt ja avatud prügila pinnalt mõõdetud metaani sisaldus	58
Lisa 5. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	60

SISSEJUHATUS

Majanduse kasvamisega ja ühiskonna heaolu tõusuga suureneb ka tarbimine, mis omakorda suurendab tekkivate jäätmete hulka ning sellest tulenevalt kasvab prügilatest lähtuva prügilagaasi hulk. 2017.aastal pärines 3% Euroopa kasvuhoonegaasidest jäätmesektorist (EUROSTAT News 2020). Jäätmete ladestamine prügilasse on üheks levinumaks viisiks, kuidas jäätmetest vabaneda. 2016.aastal ladestati prügilatesse 25% kõigist Euroopa Liidus tekkinud segaolmejäätmetest (EEA 2019), mis hakkavad seal ajajooksul lagunema.

Jäätmete lagunemise tagajärjel tekib prügilagaas, mis on ohtlik nii tervisele kui ka keskkonnale. Prügilagaas koosneb peamiselt metaanist ja süsihappegaasist ning mõlemad on kasvuhoonegaasid. Peale jäätmete ladestamist eraldub neist gaasi veel mitu kümnendit ja seetõttu on oluline tekkinud gaas kokku koguda. Mingi hetk muutub gaasi hulk niivõrd väikseks, et selle kokku kogumine muutub ebaotstarbekaks ning majanduslikult ebaefektiivseks. Seega tuleb otsida alternatiivseid lahendusi.

Biokatteid ehk metaanilagunduskatteid on uuritud mitmel pool üle maailma (Stern *et al.* 2007, Scheutz *et al.* 2004, Huber-Humer *et al.* 2009). Biokate toimib põhimõttel, et metaan lagundatakse bioaktiivses kihis ära. Biokatte rajamiseks kasutatakse tavaliselt materjale, mis on pärit prügilast kohapealt. Selliselt on võimalik kasutada ringmajanduse põhimõtteid.

Käesoleva magistritöö eesmärk on uurida biokatte tõhusust prügilast eralduva metaani lagundamisel. Magistritöö uurimisalaks on Jõelähtme prügila, mis asub Harjumaal, Jõelähtme vallas.

Käesoleva magistritöö uurimisülesanded on:

- Mõõta prügilagaasi, teha kindlaks selle koostis ja kogus katseala kattekihis ja kattekihi pinnal
- Võrrelda gaasi sisaldust kaetud ja katmata alal
- Uurida, kas gaas laguneb biokattes

Uurimisülesannete lahendamiseks viidi läbi väliuuringud vahemikus 19.08.2020 – 07.05.2021. Väliuuringute käigus mõõdeti üheksal korral metaani sisaldust kattekihi ja prügila pinnalt ning neljal korral mõõdeti prügilagaasi koostist kattekihi seest.

Käesoleva magistritöö autor soovib tänada oma juhendajat Mait Kriipsalu igakülgse abi ja abistavate nõuannete eest. Autor soovib tänada ka Kaja Orupõldu vaakumpudelite ette valmistamise ja Alar Teemuskit gaasiproovide analüüsimise eest. Lisaks soovib töö autor tänada Kertu Tiitsot ja Danel Vessmanni ja kõiki teisi Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskuse AS töötajaid, kes uuringut toetasid ja välitöödel abistasid.

Käesolev magistritöö on valminud EMÜ baasfinantseerimise projekti P200198MIMV raames, mis on alguuring uurimisgrandiks 'Tehnoloogia kasvuhoonegaaside vähendamiseks metaani lagundamise tõhustamise abil prügilate biooksüdatsioonikattekihis'.

1.TEOREETILINE ÜLEVAADE

1.1. Prügilagaas

Prügilagaasiks nimetatakse igasugust gaasi, mis tekib prügilasse ladestatud jäätmetest (Prügila rajamise,... 2021 § 2 lg 2). Orgaaniliste jäätmete ladestamisel prügilasse algab anaeroobne lagundamine, mille käigus tekib prügilagaas (EEA 2021). Suurima osa prügilagaasist moodustavad metaan (CH_4) ja süsihappegaas (CO_2) (Tabel 1).

Tabel 1. Peamised prügilagaasi koostisosad (ATSDR 2021)

Koostisosa	%
Metaan	45-60
Süsihappegaas	40-60
Lämmastik	2-5
Hapnik	0,1-1
Ammoniaak	0,1-1

Metaan on lõhnatu ja värvitu gaas. Seda tekib nii looduslikult (näiteks eraldub atmosfääri märgaladest)(Gebert, Huber-Humer 2021) kui ka inimese tegevuse tagajärjel (näiteks loomakasvatus) (IPCC 2014:360). Metaani hulk atmosfääris on suurenenud 145% võrreldes tööstusrevolutsioonieelse ajaga (Keskkonnaministeerium 2018).

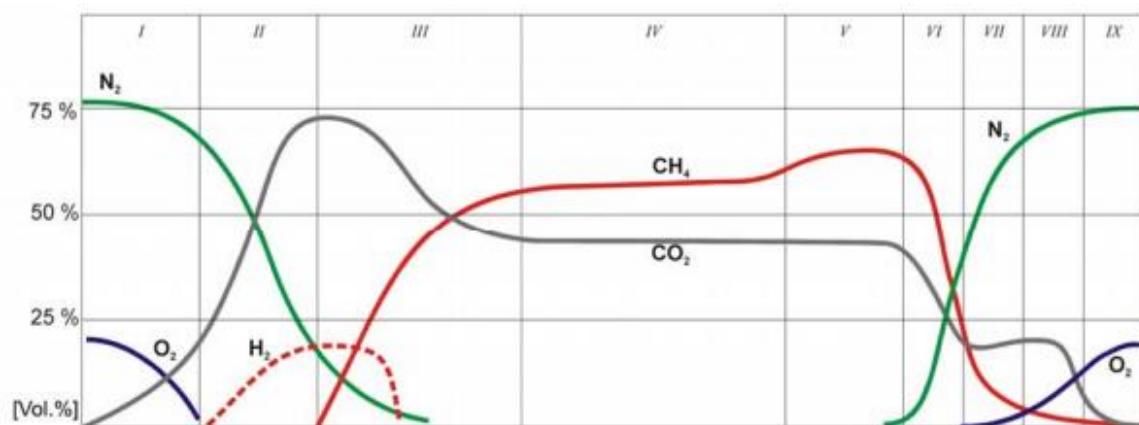
Sarnaselt metaanile on süsihappegaas samuti värvitu ja lõhnatu gaas ning samuti kasvuhoonegaas. Süsihappegaas satub atmosfääri põhiliselt fossiilsete kütuste põletamisel ja tööstuslike protsesside kaudu (IPCC 2014:358). Lisaks sellele esineb CO_2 ka looduslikult. Alates aastast 1750 kuni aastani 2011 on inimkonna põhjustatud CO_2 hulk suurenenud 40% (IPCC 2014:467).

Nii metaan kui ka süsihappegaas on kasvuhoonegaasid. Metaani globaalset soojenemist tekitav mõju 28 korda suurem kui süsihappegaasi oma (EPA 2019), kuid see-eest võib süsihappegaas püsida seal tuhandeid aastaid, metaan vaid 12 aastat (Nunez 2019). Euroopas moodustab metaani hulk 10% kogu kasvuhoonegaaside heitkogusest (European Commission... 2020), millest 3% pärineb jäätmesektorist (EUROSTAT News 2020). Terves maailmas tekib prügilates hinnanguliselt 50 miljonit tonni metaani aastas (Themelis, Ulloa 2007: 1255).

Looduslikult esineb ka metaani sidumist. Peamisteks sidujateks on troposfäär ja atmosfäär ning ka pinnased seovad metaani vähesel määral. On leitud, kui vähendada jäätmekäitlusest tuleneva metaani hulka 50% võrra, siis tekiks tasakaal metaani tekkimise ja sidumise vahel (Gebert, Huber-Humer 2021).

1.2. Prügilagaasi teke

Prügilagaasi tekib orgaaniliste jäätmete anaeroobsel lagundamisel ning selle hulk muutub aja jooksul. Prügilagaasi tekkimist võib jaotada enamasti faasideks (joonis 1).



Joonis 1. Prügilagaasi koostise muutumine aja jooksul (Wagner *et al* 2007).

Esimeses faasis ehk alfaasis on prügis rohkesti õhku ning orgaanilised ained lagunevad lademe ülemises kihis. Teises faasis ehk siirdefaasis jäätmetele enam õhk juurde ei pääse ja sealne keskkond muutub paari kuu jooksul hapnikuvaeseks. Kolmandas faasis ehk happelises anaeroobse hüdroolüüsi faasis hakkavad tegutsema fakultatiivsed ja anaeroobsed mikroorganismid. Mikroorganismid hüdroolüüsivad ja lagundavad tselluloosi ja muid biolagundatavaid aineid lihtsamateks ühenditeks, vees lahustuvateks ühenditeks, mis suurendab kergesti lagundatava aine kogust. Kolmas faas võib kesta aastaid või aastakümneid ning selle käigus tekkiv nõrgvesi on äärmiselt kange. Ajajooksul suureneb metaani tootvate mikroobide hulk prügilades. Neljandas faasis ehk metaankäärimisfaasis hakkavad prügilagaasi koostises domineerima metaan ja süsihappegaas. Selle faasi käigus vähendavad aktiivselt kulgevad bioloogilised laguprotsessid jäätmete orgaanilise aine sisaldust. Viendas faasis ehk stabiilses faasi kõik protsessid vaibuvad. (Kriipsalu *et al* 2016: 238-240) Stabiliseerumisfaasi on teised autorid (Rettenberger 2004 ref Wagner 2007) aga põhjalikumalt lahti seletanud ning eristavad kuni üheksa faasi. Alates kuuendast faasist hakkab prügilagaasi teke vähenema, sest õhk pääseb prügilademele paremini ligi ja metaani tootmine ajajooksul väheneb kuni lõpuks peatub. Üheksanda faasi lõpuks gaaside kontsentratsioon sarnaneb loodusliku pinnase või mullaga.

Mida kiiremini orgaaniline aine laguneb, seda kiiremini kogu prügilade stabiliseerub (Kriipsalu *et al* 2016:240) ning insenertehniliste võtete abil on võimalik stabiliseerumist kiirendada.

1.3. Prügilagaasi kogumine ja käitlemine

Prügila, kus ladestatakse biolagunevaid jäätmeid, sh olmejäätmeid, peab olema varustatud gaasipüüde ja kogumise seadmetega, et vältida prügilagaasi kontrollimatut kogunemist ja väljaimbumist (Prügila rajamise, ... 2021 § 15 lg 1). Prügilagaasi kogumise peab korraldama käitaja ning juhul, kui kogutud gaasi ei ole võimalik taaskasutada, siis see põletatakse (Prügila rajamise, ... 2021 § 30 lg 1, lg 3).

Prügilagaasi levimist tuleb ära hoida ning selleks on loodud mitmeid viise. Üheks levinumaks gaasi kogumise viisiks on aktiivsed gaasikogumissüsteemid, mis koosnevad

horisontaalsetest või vertikaalsetest kollektoritest, mille abil pumbatakse gaas välja (Kriipsalu *et al* 2016: 243). Vertikaalseid gaasikollektoreid paigaldatakse puurimise teel tavaliselt siis, kui prügilalaadestusala on mingi piirini täidetud või jäätmete ladestamine on lõppenud, horisontaalsed gaasikollektoreid paigaldatakse kaevamise teel prügi sisse lademe kõrgemaks kasvamise käigus (Tchobanoglous, Kreith 2002:691 – 692). Kogutud gaasist toodetakse soojust või elektrit, kui seda ei saa teha, siis lihtsalt põletatakse (Themelis, Ulloa 2007:1246).

Passiivses gaasiväljalaskesüsteemis tõuseb gaas mööda püstiseid torusid maapinnale ning see lendub või põletatakse (Kriipsalu *et al* 2016: 244, Tchobanoglous, Kreith 2002:693). Seda on vaja eelkõige selleks, et vältida prügilatahistu rikkumist gaasirõhu tõttu.

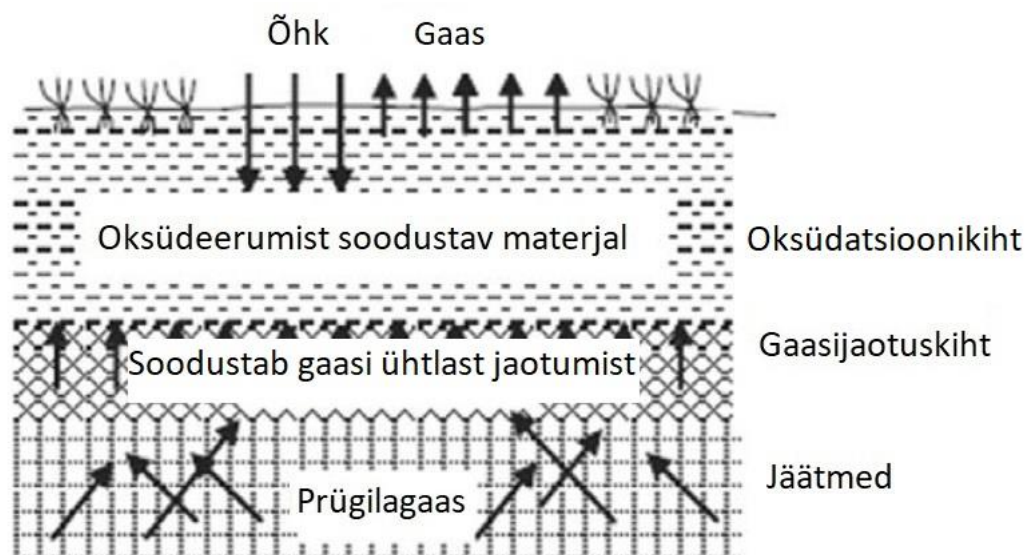
Väikestes ja vanades prügilates on tihtipeale gaasi hulk liiga väike ja seda on raske kinni püüda (Wagner *et al.* 2007) ning gaasikogumissüsteemi paigaldamine ei ole enam otstarbekas (Huber-Humer *et al.* 2009). Seetõttu muutub gaasi kogumine mingi hetk liiga kulukaks.

1.4. Metaanilagunduskatte prügilala kattekihina

Selleks, et toimuks biokattes metaani bioloogiline lagunemine, peavad kattes koos esinema metaan (CH_4) ja hapnik (O_2) ning metaani oksüdeerumisel tekib süsihappegaas (CO_2), vesi ja biomass (Chavan, Kumar 2018:452)(Abushammala *et al.* 2014:2).

Biokatte ehk metaanilagunduskatte rajamine on otstarbekas prügilates, kus prügilagaasi tekib vähe või kus gaasi teke on vähenenud (Huber-Humer *et al.* 2008:42, Kriipsalu *et al.* 2016:262). Tegu on majanduslikult odavamaga variandiga (Einola 2010, Abushammala *et al.* 2014:11), sest kattematerjal pärineb üldjuhul prügilast kohapealt.

Biokatte ehk metaanilagunduskiht koosneb oksüdatsioonikihist ja gaasijaotuskihist (Humer, Lechner 2001 ref Chavan, Kumar 2018)(joonis 2). Oksüdatsioonikihist peavad prügilagaas ja sademevesi ühtlaselt läbi pääsema (Kriipsalu *et al.* 2016:262). Gaasijaotuskihi eesmärk on juhtida prügilagaas oksüdatsioonikihi (Kriipsalu *et al.* 2016:263).



Joonis 2. Metaanilagunduskatte läbilõige (Gebert, Huber-Humer 2021).

Gaasijaotuskiht tehakse mineraalsest koredast materjalist, mis juhib hästi gaasi. Materjaliks võib olla killustik, kuid selle valmistamisel on kasutatud ka purustatud klaasi või kruusa (Stern *et al.* 2007). Gaasijaotuskiht peaks olema 50 cm paks (Kriipsalu *et al.* 2016:263). Gaasijaotuskiht ei tohi olla karbonaatne, st paekivi ega lammutusbetoon ei sobi.

Oksüdatsioonikihi tuseduseks peaks olema vähemalt 120 cm (Kriipsalu *et al.* 2016:262). Metaan laguneb ka õhemas kihis, kuid Einola (2010) leidis Soomes Aikkala prügilas läbiviidud uurimuses, et talvisel ajal 50 cm paksuses oksüdatsioonikihis metaani oksüdeerumine aeglustub. Seega tusedama kihi rajamine (näiteks 100 cm) aitaks kaasa metaani oksüdeerumisel talvisel ajal (Einola 2010:86).

Oksüdatsioonikihi materjalina sobib kasutada materjale, mis sisaldavad orgaanikat. Kattematerjalina võib kasutada hakitud aiajäätmeid (Stern *et al.* 2007:1250, Barlaz *et al.* 2004:4892), reoveesetekomposti (Kettunen *et al.* 2006: 317), aia- ja sööklajäätmete segu (Scheutz *et al.* 2014:1185), komposti (7-Mile Landfill... 2020:11) või mehaanilis-bioloogiliselt töödeldud segaolmejäätmeid (Einola 2010:29).

Kõige paremini sobib kattematerjalina kasutada komposti, milles on kõrge orgaanika sisaldus. See loob head tingimused erinevatele mikroorganismidele. Orgaaniline materjal peab olema stabiliseerunud (Huber-Humer *et al.* 2009:2095), sest vastasel juhul võib protsess muutuda vastupidiseks ehk materjal ise võib osutuda metaani allikaks (Barlaz *et al.* 2004). Samas pole mõtet kasutada kattematerjaliks väga hea kvaliteediga komposti.

Kettunen *et al.* (2006:331) soovib kompostitud materjal segada jämedakoelise mineraalse materjaliga, et tagada hea gaasi liikumine suurematel sügavustel.

Metanotroofid on bakterid, kes lagundavad metaani. Metanotroofid on tundlikud temperatuuri suhtes ja seega peetakse temperatuuri üheks olulisemaks näitajaks kattekihis. Optimaalne temperatuur, mil metanotroofsed organismid toimivad kõige paremini, on vahemikus +15 kuni +35 C° (Zeiss 2006: 287), kuid on metaani edukas oksüdeerumine võib toimuda ka madalamatel temperatuuridel (+2 C° (Scheutz, Kjeldsen 2004:78)).

Niiskust kattematerjalis peetakse temperatuuri järel teiseks kõige olulisemaks näitajaks. Niiskuse sisalduse roll on erinevate materjalide puhul erinev, sõltudes materjali poorsusest, kuid optimaalseks niiskussisalduseks peetakse vahemikku 8% - 50% (Zeiss 2006:287). Liiga kõrge niiskuse sisaldus raskendab hapniku kattekihti tungimist, mis omakorda aeglustab metaani oksüdeerimist (Abushammala *et al.* 2014:4). Scheutz, Kjeldsen (2004:78) uuringus selgus, et maksimaalne metaani oksüdeerumiskiirus saavutati, kui niiskuse sisaldus oli 25%. Christophersen *et al.* (2000) oma uuringus, et optimaalne niiskuse sisaldus metaani oksüdeerimiseks on vahemikus 11-23%.

Orgaanilise aine sisaldus materjalis on oluline, sest see avaldab mõju oksüdatsiooni kiirusele ning suurendab mõne protsendi jagu niiskuse sisaldust (Christophersen *et al.* 2000). Orgaanilise aine kuivmassi sisaldus võiks olla vähemalt 15% (Huber-Humer *et al.* 2009:2096).

Kattematerjalis tegutsevatele metanotroofsetele bakteritele sobib pH vahemikus 6,5-8,5 (Chapman, Antizar Ladislao 2013:61, Huber-Humer *et al.* 2009:2096). Taanis läbiviidud uuringus leiti, et optimaalne metaani oksüdeerimine toimub pH 6,9 juures (Scheutz, Kjeldsen 2004).

Biokatteid ja nende efektiivsust on uuritud mitmel pool maailmas.

Stern *et al.* (2007) poolt läbiviidud aastases uurimuses selgus, et biokattega kaetud alal oli metaaniheide 10 korda väiksem kui katmata alal. Scheutz *et al.* (2014) lõid katsealal biokatte süsteemi, millega suudeti metaaniheidet keskmiselt vähendada 80%. Kettunen *et al.* (2006) suutis biokattega metaaniheidet vähendada kuni 97%.

Barlaz *et al.* (2004) läbiviidud uuringus katsetati, kui palju muutub metaani emissioon, siis kui välja lülitada gaasikogumissüsteem ning võrreldi biokattega ala ja tavalise pinnasega kaetud ala tulemusi. Tulemustest selgus, et biokattega alal ei suurenenud metaani emissioon,

kui gaasikogumissüsteem ei toiminud, ning metaani oksüdeerumine oli biokattega alal oli oluliselt kõrgem kui tavalise pinnasega kaetud alal.

Varasemalt on Eestis uuritud metaanilagunduskatteid kolmes prügilas – Kudjape, Sillamäe ja Uikala prügilates. Kudjape prügilas valmistati metaanilagunduskatte prügilast välja kaevandatud ja sõelatud peenfraktsioonist (Heinsoo 2016). Sillamäe prügilas kasutati metaanilagunduskatte rajamisel bioloogiliselt-mehaaniliselt töödeldud jäätmeid (Sellik 2018). Kudjape prügila kui ka Sillamäe prügila puhul on tegu suletud prügilatega. Nii Kudjape prügilas kui ka Sillamäe prügilas läbiviidud uuringute tulemustest selgus, et mõlema prügila metaanilagunduskatted metaani atmosfääri ei lase (Heinsoo 2016:61; Sellik 2018:37).

Perioodil 2018 – 2020 uuriti metaanilagunduskatte toimimist Uikala prügilas (Tsibernaja 2019, Prangli 2020). Uikala prügilas loodi kaks eksperimentaalset metaanilagunduskattega ala, millest üks oli kaetud 0–20 mm ja teine 0–40 mm jäätmete mehaanilis-bioloogilise töötlemise käigus saadud fraktsiooniga. Uuringutest selgus, et katsealalt lendub metaani väikeses koguses ning 0–40 fraktsiooniga katseala toimib paremini, sest metaani emissioon oli madalam (Prangli 2020: 34).

1.5. Jäätmealased poliitikad ja strateegiad Euroopa Liidus ja Eestis

Euroopa Liidu jäätmepoliitika peamiseks eesmärgiks on vähendada või vältida jäätmeteket ning panustada rohkem jäätmete korduskasutamisele ja ringlusse võtule. Euroopa Liidu jäätmete raamdirektiiv sätestab jäätmealase põhiraamistiku ja jäätmehierarhia kohaldamise (Direktiiv 2008/98/EÜ). Jäätmehierarhia põhimõte seisneb selles, et parim lahendus on jäätmetekke vältimine, millele järgneb taaskasutus. Kõige kehvemaks lahenduseks on jäätmete kõrvaldamine ehk nende ladestamine prügilasse (Keskkonnaministeerium 2020).

Direktiiv 1999/31/EÜ eesmärk on vähendada jäätmete ladestamisest tuleneda võivat negatiivset mõju keskkonnale. Samas direktiivis on kehtestatud nõue, et liikmesriigid peavad vähendama järk-järgult prügilasse veetavate biolagunevate jäätmete hulka (Direktiiv 1999/31/EÜ).

2018. aastal ilmus direktiiv 2018/850, millega muudeti direktiivi 1999/31/EÜ. Direktiivi 2018/850 peamine eesmärk on toetada ringmajandusel üleminekut. Direktiivis nähakse ette, et alates aastast 2030 ei tohi prügilatesse ladestada jäätmeid, mis sobivad ringlussevõtuks või mida on võimalik energia või materjalina kasutada (Direktiiv 2018/850).

2020. aastal esitles Euroopa Komisjon metaaniheite vähendamise strateegiat (COM (2020) 663 final), kus on toodud sektoriülesed ja sektoripõhised meetmed. Strateegia soovitab jäätmesektorist pärineva metaaniheite vähendamiseks ühe meetmena biooksüdatsioonitehnoloogia kasutamist, eeldusel, et gaasi kasutamine ei ole enam otstarbekas (Metaaniheite vähendamise strateegia 2020). Metaaniheite vähendamise strateegia rakendamine aitab saavutada Euroopa Roheleppe (COM(2019) 640 final) eesmärgi.

Eestis reguleerib prügila sulgemist keskkonnaministri määrus „Prügila rajamis, kasutamise ja sulgemise nõuded“. Tavajäätmeprügila lõplikul sulgemisel tuleb jäätmelade katta gaasi kogumiskihi, vettpidava mineraalkihi, vähemalt 0,5 meetri paksuse drenikihi ja vähemalt 1 meetri paksuse kattepinna kihiga (Prügila rajamise... 2021 §35 lg 1 punkt 2). Juhul kui, pädev amet leiab, et prügila ohustab keskkonna tavapärasest vähem või muu lahendusega on võimalik saavutada samaväärne tulemus, võib vastav amet lubada prügila kattekonstruktsiooni muutmist (Prügila rajamise,... 2021 § 35 lg 2, lg 3).

1.6. Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus

Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus AS (eelnevalt Tallinna Prügila AS) asub Harjumaal, Jõelähtme vallas, Rebala külas. Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus asub ligikaudu 6,5 kilomeetri kaugusel Maardu linnast ja ligikaudu 20 kilomeetri kaugusel Tallinna linnast. Territoorium on ümbritsetud metsaga (joonis 3).



Joonis 3. Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskuse asukoht kaardil (Maa-amet 2021). Katseala paiknemine on joonisel märgitud ruuduga.

Prügila alustas tööd 02. juunil 2003 aastal (Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus... 2019). Prügila on rajatud ammendunud Maardu fosforiidikarjääri alale (Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus 2021). Ettevõtte põhilisteks tegevusteks on jäätmete vedu, jäätmekütuse tootmine, biojäätmete kompostimine, koldetuha käitlemine ja vanandamine ning jäätmete ladestamine (Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus... 2019).

Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskusel on olemas kehtiv keskkonnakompleksluba L.KKL.HA-18510 (Keskkonnaamet 2019).

Prügila põhi ja küljed on kaetud vettpidavast materjalist kihi ja drenaaziga. Ladestusalalt tulev nõrgvesi kogutakse ja juhitakse lähimasse sobivasse reoveepuhastisse. Ladestusalal gaasi kogumiseks kasutatakse prügilas vertikaalseid kogumiskaevusid, mis on ühendatud kompressorjaamaga. Kaevud ulatuvad kahe meetrit kauguseni prügila aluspõhjast ning neid

pikendatakse vertikaalselt sedamööda, kuidas kasvab ladestusala. Gaasi kasutatakse elektrienergia tootmiseks. (Keskkonnaamet 2019).

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Katseala

2014. aastal koostatud „Ladestusala sulgemise projekt“ nägi ette rajada ladestusalale 11 väikest bioakent. 2017. aastal muudeti ladestusala sulgemisprojekti ning soovitati rajada hoopis kaks suurt bioakent, sest neid on ehituslikult lihtsam ja parem rajada (Projekteerija arvamus... 2020).

Üks bioaken on suurusjärgus 80 x 155 meetrit. Bioaknaid on kokku kaks ning nende vahel asub teenindusala, mille laius on 50 meetrit (TJTK ladestusala... 2017). Bioakende pindala kokku on ette nähtud 24 800 m². Katseala on rajatud ladestusalale, kus jäätmete ladestamine on lõppenud.

Tallinna Jäätmete Taaskasutamiskeskuse sulgemislahendus näeb ette, et bioakna muudetud konstruktsioon ülevalt alla on:

- 0,2 – 0,5 meetrit kasvukiht koos haljastusega
- 3,5 – 4 meetrit biooksüdatsioonikiht
- 0,3 – 0,7 meetrit toetus- ja gaasijaotuskiht

Oksüdatsioonikiht on rajatud tüsedam kui kirjanduses soovitatud. Selle üheks eeliseks on see, et tüsedamas kihis viibeaeg on pikem ning viibeaeg (aeg, mis kulub metaanil kihi läbimiseks) sõltub metaani lagundamise efektiivsus. Sellise kihikonstruktsiooni puuduseks võib kujuneda see, et kate tiheneb oma raskuse all ja õhu liikumine muutub raskeks (TJT Jõelähtme prügila sulgemine... 2020).

Magistritöö uurimisülesanded olid:

- Mõõta prügilagaasi bioakna pinnalt ja seest, teha kindlaks selle koostis ja kogus
- Võrrelda gaasi sisaldust kaetud ja katmata alal
- Uurida, kas gaas laguneb biokattes

Uurimisülesannete lahendamiseks viidi läbi väliuuringud vahemikus 19.08.2020 – 07.05.2021. Väliuuringute käigus mõõdeti üheksal korral metaani sisaldust kattekihi ja prügila pinnalt ning neljal korral mõõdeti prügilagaasi koostist kattekihi seest.

2.2. Biokatte materjali iseloomustamine

2020. aastaks välja ehitatud biokate koosnes kahest kihist: biooksüdatsioonikihist, mis valmistati mehhaanilis-bioloogiliselt töödeldud ja sõelutud segaolmejäätmetest ning gaasijaotuskihist, mis valmistati Iru jäätmeenergiaploki koldetuhast. (TJTK ladestusala... 2017).

09.12.2020 kaevati biokate lahti, paigaldati gaasikaevud (K2) ning väljakaevatud katematerjalist ja tuhast võeti proovid laboris analüüsimiseks. Sõelumine ja sortimine viidi läbi Eesti Maaülikooli laboris.

Katematerjali sõeluti esmalt käsitsi suurte võõriste eemaldamiseks. Selleks kasutati augulise põhjaga kasti (ava 15 mm) ning kõik, mis sellest läbi läks, sõeluti sõeluriga üle. Masinsõelumisel kasutati sõelurit Retsch AS 200 basic (joonis 4). Masinsõelumisel kasutati sõelasid, mille avaus oli 10 mm, 8 mm, 6,3 mm, 4 mm, 2 mm ja 1 mm. Pärast masinsõelumist võeti sõelad lahti ning kaaluti ära. Kaalumiseks kasutati kaalu KERN PES, mille maksimaalne kaal on 31000 grammi ja minimaalne määramispiirkond on 5 grammi.

Sõelumise ja sortimise tulemused jagati $> 8\text{mm}$ ja $< 8\text{mm}$. Saadud tulemuste põhjal arvutati massiprotsent.



Joonis 4. Masinsõelur (Retsch AS 200 basic) koos sõelatorniga; autori foto.

Koldetuhka ja kattematerjal sorditi käsitsi, et teada saada, millistest jäätmeliikidest tuhk ja kattematerjal koosnevad. Kattematerjali ja tuha märgkaal, mida käsitsi sõeluti, oli vastavalt 10,2 kg ja 4,6 kg.

2.3. Gaasikaevude ja rõngaste paigaldamine

Katsealale paigaldati kaks gaasiseirekaevu (K1 ja K2) ja seitse mõõterõngast (R1-R7).

Kaevud

Magistritöö raames paigaldati katsealale kaks gaasiseirekaevu. Kaev K1 paigaldati 02.12.2020 ja kaev K2 paigaldati 09.12.2020.

Kaevud paigaldati katsealale kaevatud 4 meetri sügavusele auku, mis hiljem täideti algselt välja kaevatud materjaliga. Enne augu täitmist võeti kattematerjalist ja tuhost proovid hilisemaks analüüsimiseks. Lisaks mõõtetorudele paigaldati kaevude juurde ka õhutorud, millega on võimalik bioakent õhustada (joonis 5).



Joonis 5. Kaevu K1 paigaldamine; mõõtetorude taga paikneb 100 mm läbimõõduga õhutoru; autori foto.

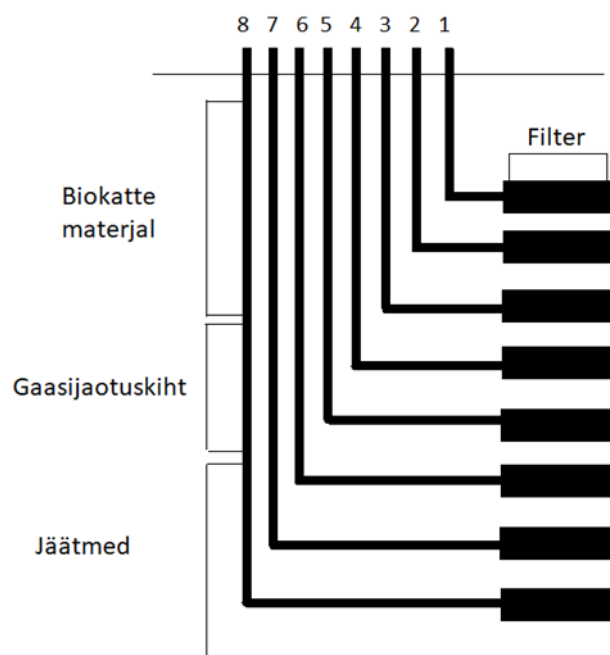
Mõlemad kaevud koosnevad kaheksast mõõtetorust, millest kõige lühem on 0,5 meetrit ja pikim on 4 meetrit. Mõõtetorude siseläbimõõt on 25 mm. Igale mõõtetorule paigaldati horisontaalsuunas 500 mm pilufilter, mille läbimõõduks on 65 mm ja avade suurus 0,1 mm. Selliselt jäävad torud erinevatele sügavustele, mis võimaldab uurida gaaside sisaldust sealt.

Kaevu K1 kõige lühem toru paikneb 0,44 meetri sügavusel ning kõige pikem paikneb 3,58 meetri sügavusel. Kaevu K2 kõige lühem toru paikneb 0,34 meetri sügavusel ja kõige pikem 3,71 meetri sügavusel pinnalt mõõdetuna (tabel 2)(joonis 6).

Tabel 2. Mõõtetasemete legend (rohelisega märgitud torud asuvad kattematerjalis, sinisega märgitud torud asuvad gaasijaotuskihis ning oranžiga märgitud torud paiknevad prügis)

	Toru sügavus maapinnast (m)	
Mõõtetase	Kaev K1	Kaev K2
1	0,44	0,34
2	0,91	0,82
3	1,37	1,33
4	1,86	1,82
5	2,37	2,38
6	2,88	2,82
7	3,26	3,24
8	3,58	3,71

Mõlema kaevu mõõtetorud 8, 7 ja 6 paiknevad paigaldati prügi sisse, kaevu K1 mõõtetoru 5 ja kaevu K2 mõõtetoru 5 ja 4 läksid gaasijaotuskihi sisse ning kaevu K1 torud 4, 3, 2 ja 1 ja kaevu K2 torud 3, 2 ja 1 kaeti biokatte materjaliga.



Joonis 6. Mõõdetorude paiknemine kattekihi sees.

Torud suleti pealt korgiga, mis enne iga mõõtmist eemaldati (joonis 7). Mõõtepunktid kaitsti pealt plastkonteineritega.



Joonis 7. Kaev K2 paigaldatuna; autori foto.

Mõõterõngad

Selleks, et teada saada, kui palju gaasi eraldub avatud prügila või bioakna pinnalt täpselt samas mõõtepunktis, paigaldati katseala eri kohtaesse seitse mõõterõngast. Kolm rõngast (R1, R2, ja R3)(joonis 8) paigaldati biokattega kaetud alale ja neli rõngast (R4, R5, R6 ja R7) paigaldati avatud prügila pinnale. Rõngas R1 asub kaevu K1 kõrval, rõngaste R2 ja R3 vahel asub kaev K2. Bioaknale paigaldatud rõngad süvistati pinnasesse selliselt, et pinnale jääks rõnga soon vesiluku jaoks, kuhu proovivõtu ajal gaasikogumiskuppel asetada (joonis 9). Vesilukk võimaldas vältida välisõhu tungimist mõõterõnga alla mõõtmise käigus. Prügila pinnale paigaldatud rõngad asetati otse prügi pinnale ja rõnga ümbrus tihendati ligi 15 cm liivakihi, et rõngas püsiks liikumatuna.



Joonis 8. Rõngas R2 biokattega alal; autori foto.



Joonis 9. Gaasikogumiskuppel avatud prügila pinnale pandud rõngal R7; autori foto.

2.4. Prügilagaasi mõõtmise katseala pinnalt

Prügilagaasi mõõdeti katseala pinnalt üheksal korral (tabel 3).

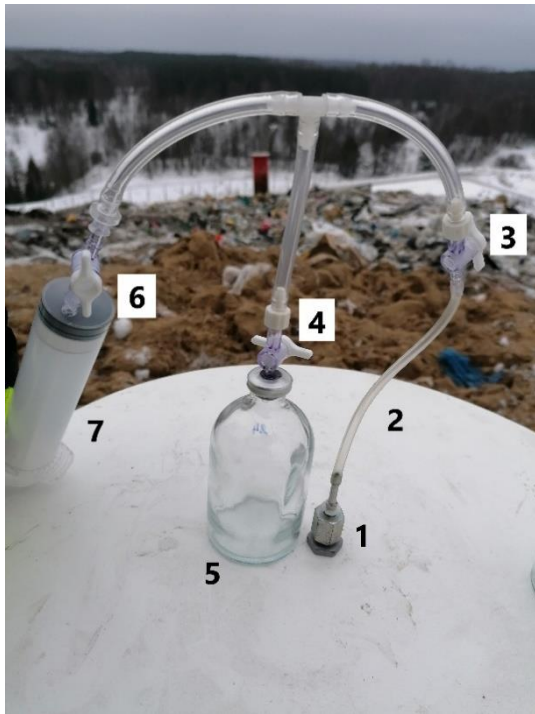
Tabel 3. Proovivõtu graafik; ristiga tähistatud lahter näitab, mis kuupäeva on milliselt rõngalt proove võetud

	19.08. 2020	02.10. 2020	21.10. 2020	02.12. 2020	09.12. 2020	20.01. 2021	22.02. 2021	05.04. 2021	07.05. 2021
R1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
R2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
R3						X	X	X	X
R4					X	X	X	X	X
R5							X	X	X
R6							X	X	X
R7		X					X	X	X

Gaasi mõõtmiseks asetati iga rõnga peale kuppel (maht 64,6 liitrit), millel olev otsik ühendati kummitoruga. Peale kupli asetamist valati rõnga ja kupli vahele jääv pilu vett täis, et takistada õhu tungimist kupli alla. Proov võeti kohe pärast kupli paigaldamist ja siis uuesti 10, 20 ja 30 minuti pärast. Proovid võeti 100 ml vakumeeritud pudelitesse (joonis 10).



Joonis 10. Vakumeeritud pudel ventiiliga; autori foto.



Joonis 11. Gaasi kogumine vakumeeritud pudelisse. 1 – kupli otsik; 2 – kummitoru; 3 – kummitoru ventiil; 4 – vaakumpudeli ventiil; 5 – vaakumpudel; 6 – süstla ventiil; 7 - süstal; autori foto.

Kupli peal olev otsik ühendati kummitoruga (joonisel 11 märgitud nr 1). Peale seda avati otsiku ja süstla juures olevad ventiilid (joonisel 11 märgitud nr 3 ja nr 6), et saaks tõmmata seisnud õhu välja ega satuks pudelisse. Seejärel suleti süstla juures olev ventiil ning avati pudeli kohal olev ventiil (joonisel 11 märgitud nr 4), et gaas saaks tekkinud alarõhu tõttu pudelisse (joonise 11 märgitud nr 5) liikuda. Peale pudeli täitumist gaasiga suleti pudeli kohal olev ventiil ja otsiku kohal olev ventiil ning eemaldati proovivõtu pudel. Seejärel avati süstla juures olev ventiil ning suruti süstlas olev seisnud õhk välja. Ühelt rõngalt võeti kokku neli proovi 30 minuti jooksul.

2.5. Prügilagaasi mõõtmine katseala kattekihi seest

Katseala kattekihi seest mõõdeti prügilagaasi sisaldust mõlemast kaevust. Prügilagaasi mõõtmist kattekihi seest teostati neljal korral: 20.01.2021, 22.02.2021, 04.05.2021 ja 07.05.2021.

Erinevate gaaside sisaldust torudes mõõdeti gaasianalüsaatoriga GA5000. Gaasianalüsaator töötab temperatuuri vahemikus -10°C kuni $+50^{\circ}\text{C}$ (Geotech 2020). Seadme mõõteulatus on CH_4 puhul 0 – 100%, CO_2 puhul 0 – 100% ning O_2 puhul 0 – 25%. Seadme mõõtetäpsus on 0,5% CH_4 kontsentratsioonil 0 – 70% ja CO_2 kontsentratsioonil 0 – 60%.

Erinevate gaaside sisalduse mõõtmiseks eemaldati gaasiseirekaevude mõõtetorult kork ning ühendati gaasianalüsaatoriga. Lugem võeti peale näitude stabiliseerumist. Gaasianalüsaatorit ventileeriti enne järgmisest torust gaasi mõõtmist hapniku näidu stabiliseerumiseni (joonis 12).



Joonis 12. Kaevu K2 gaasiseirekaevu mõõtetorud, millest üks on ühendatud temperatuuri anduriga; autori foto.

Peale gaasianalüsaatoriga mõõtmist, mõõdeti torus temperatuuri. Selleks kasutati digitaalset termomeetrit 6802 II Dual Channel Digital Thermometer. Peale näidu stabiliseerumist pandi lugem kirja.

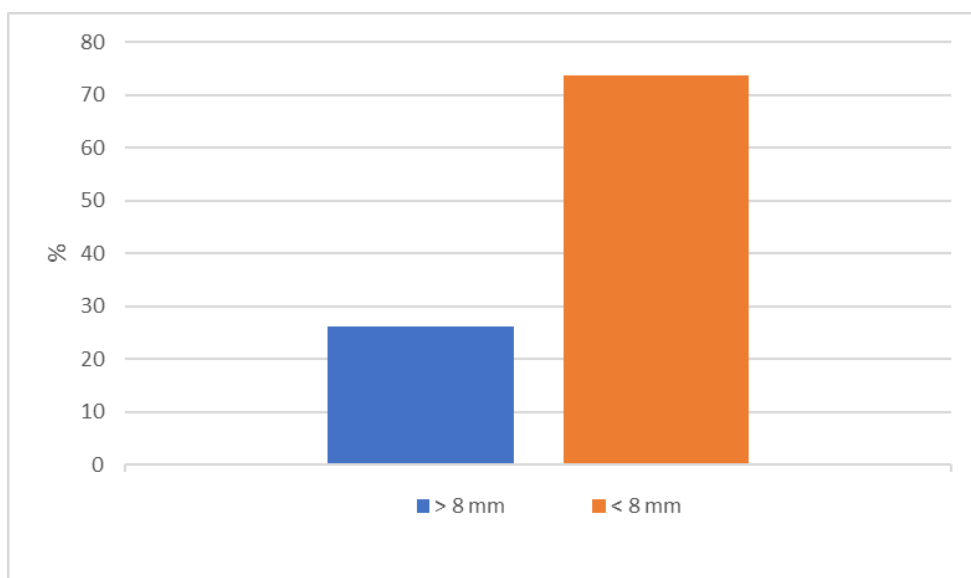
Mõõtmise käigus kontrolliti veeluku olemasolu torudes. Kontrolliks kasutati helianduriga mõõdulinti, mis niiskuse korral annab helisignaali.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Biokatte materjali sõelumine ja sortimine

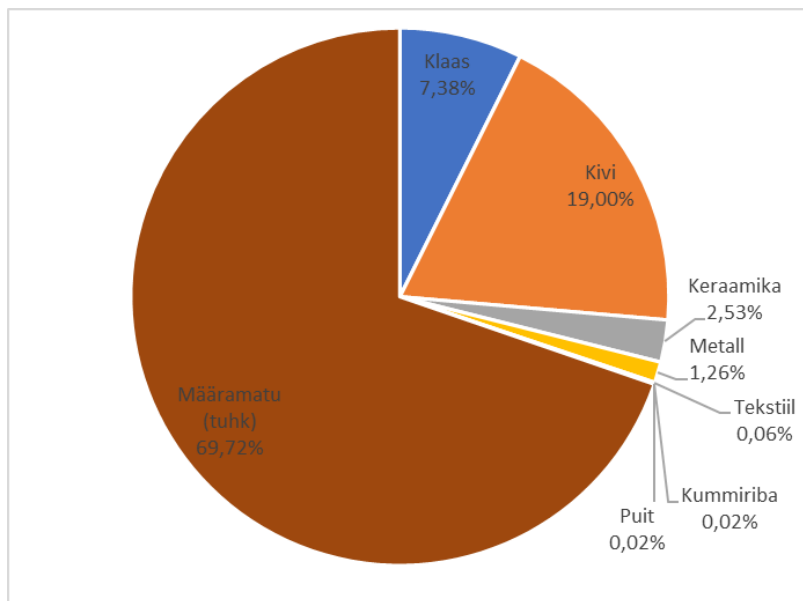
Tuhk

Tuhka sõeluti kokku 4620 grammi. Sõelumise tulemustest selgub, et kõige enam on tuhka suurusega < 8 mm, mida on 73,8% ehk 3408 grammi. > 8 mm fraktsiooni osakaal on 26,2% ehk 121 grammi (joonis 13)(lisa 1, tabel 1.1).



Joonis 13. Bioaknas gaasijaotuskihis kasutatava tuha fraktsioonid (protsent massist).

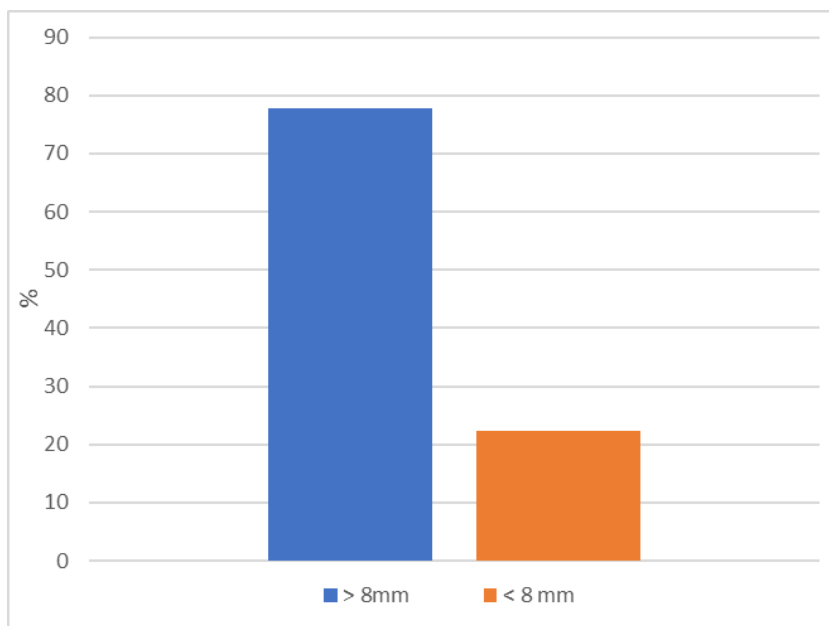
Tuha sortimise tulemusel arvutati massiprotsent. Kõige enam oli määramatut tuhataolist materjali, seda oli kokku 69,72% ehk 3221 grammi. Järgnesid kivid, mida oli kokku 878 grammi ehk 19%, ja klaas, mida oli 341 ehk 7,38% (joonis 14). Muid jäätmeliike esines vähem. Gaasi liikumise jaoks on vajalik, et jaotuskiht oleks võimalikult poorne. Edaspidi tuleks kasuks tuha sõelumine, et vähendada veelgi peeneteralise materjali osakaalu.



Joonis 14. Bioakna gaasijaotuskihis kasutatava tuha koostis (protsent massist).

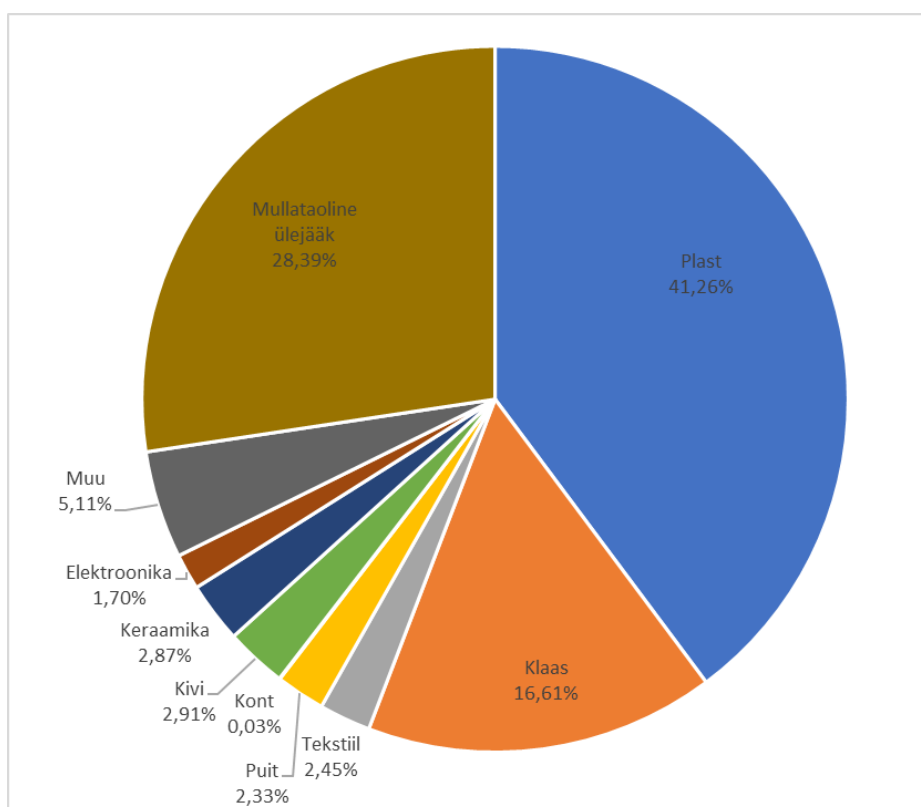
Kattematerjal

Kattematerjali sõeluti kokku 10 279 grammi. 77,8% sõelutud kattematerjalist on suurem kui 8 mm ning 22,2% on väiksem kui 8 mm (joonis 15)(lisa 1, tabel 1.2).



Joonis 15. Bioaknas kasutatava materjali fraktsioonid (protsent massist)

Sorteerimise tulemusena selgus, et analüüsitud materjalis esineb kõige enam plasti (41,26% ehk 4241 grammi) (joonis 16). Enamus plastist oli suurem kui 8 mm. 28,39% ehk 2918 grammi oli mullataolist materjali, mis on biokile hoidmiseks vajalik. Seda leidis peamiselt < 8 mm fraktsioonis. Klaasi oli 16,61% ehk 1707 grammi. Muid jäätmeliike oli oluliselt vähem. Ükski koostisosadest ei takista mikroobikoosluse tööd, kuid vältida tuleb seda, et jäätmetes leiduvad materjalid ei moodustaks gaasi ja vett mitteläbilaskvat kihti.



Joonis 16. Bioaknas kasutatava materjali koostis (protsent massist)

Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskuse biokattes kasutatava materjali koostist on määratud ka varem. Kokku sõeluti ja sorditi 4371,95 grammi kattematerjali. Sõelumise tulemustest selgus, et väiksem kui 8 mm fraktsiooni on ligi 10% jagu rohkem. 55,7% sõelutud fraktsioonist oli < 8 mm ja seega 44,3% oli > 8 mm (TJT Tallinna prügila bioakna uuringud 2021). Tulemuste mõningane erinevus illustreerib asjaolu, et väga suure koguse kattematerjali saamine erineva koostisega lähtejäätmetest on keeruline. Mida rohkem jäätmeid eelnevalt töödeldakse, seda rohkem ühtlustub nende koostis ja omadused.

Kui käesoleva töö raames analüüsiti ühte proovikogust, siis TJT Tallinna prügila bioakna uuringu (2021) raames analüüsiti nelja erinevat proovi. Kattekihi koostise määramist tuleb kindlasti tulevikus korrata, et kujuneks statistiliselt usutav pilt materjali koostisest.

3.2. Gaaside sisaldus kattekihi sees

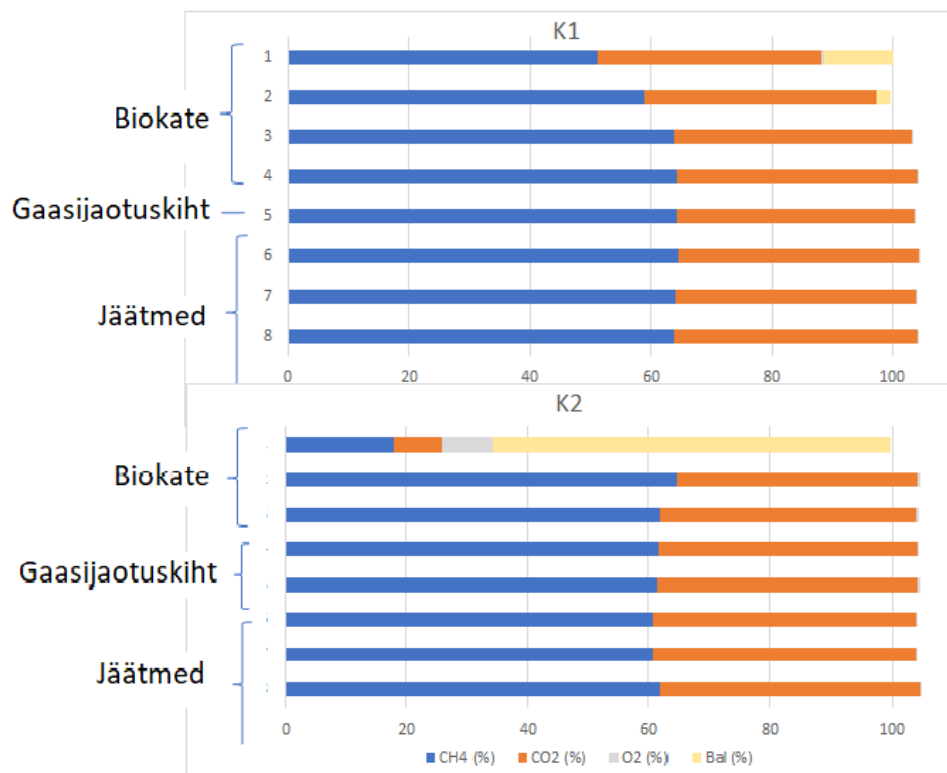
Kuigi kaev K1 paigaldati 02.12.2020 ja kaev K2 paigaldati 09.12.2020, siis esimene mõõtmine mõlemas kaevus toimus 20.01.2021. Lisaks sellele kuupäevale mõõdeti gaaside sisaldust mõõtetorudest kuupäevadel 22.02.2021, 05.04.2021 ja 07.05.2021. Tabelis 2 on näidatud gaaside sisaldus erinevatel mõõtetasemetel.

Mõõtmised teostati ettevõtte gaasianalüsaatoriga. Mõõtmistingimused olid kohati rasked, nt esines väga madalaid temperatuure, aeg-ajalt sadas vihma ja lund ning prügila tipus oli kogu aeg väga tuuline. Ilmaolud võisid mõjutada käesoleva töö mõõtmistulemusi, mida edasistes uuringutes tuleb silmas pidada. Juhul, kui gaasianalüsaator andis mõõtmise käigus ebausutava tulemuse, teostati kordusmõõtmine. 20.01.2021 toimunud mõõtmiselt ei andnud gaasianalüsaator kaevu K2 mõõtetasemelt 1 tulemust, mistõttu teostati kordusmõõtmine. Kordusmõõtmine andis metaani sisalduseks 17,9%, mis oluliselt erines esialgsest tulemusest, milleks oli 0,1% (lisa 3, tabel 3.2). Joonistel 18 ja 19 kajastuvad ainult kordusmõõtmistel saadud tulemused. Ebausaldusväärseks loetud tulemused on joonistel viirutatud ja need tuleks käesoleva töö kontekstis pigem välja jätta.

22.02.2021 teostatud mõõtmisel esines kaevus K1 sügavusel 8 vett (kondensatsiooniveest moodustunud vesilukk) ja seega gaasianalüsaator ei andnud korrektset tulemust. 05.04.2021 toimunud mõõtmisel ei andnud gaasianalüsaator kaevu K2 sügavusest 5 ja 8 tulemust, seega teostati kordusmõõtmine. Teise mõõtmise käigus ei andnud gaasianalüsaator jätkuvalt tulemust. Vett nendes torudes ei esinenud.

Joonistel on lisaks metaanile, süsihappegaasile ja hapnikule kujutatud ka ballast gaasi. Antud näitaja näitab teiste gaaside sisaldust. Arvatavasti on tegu õhulämmastikuga, kuid käesoleva tööga ei ole seda uuritud ja seega pole teada täpselt, mis gaaside seguga on tegemist.

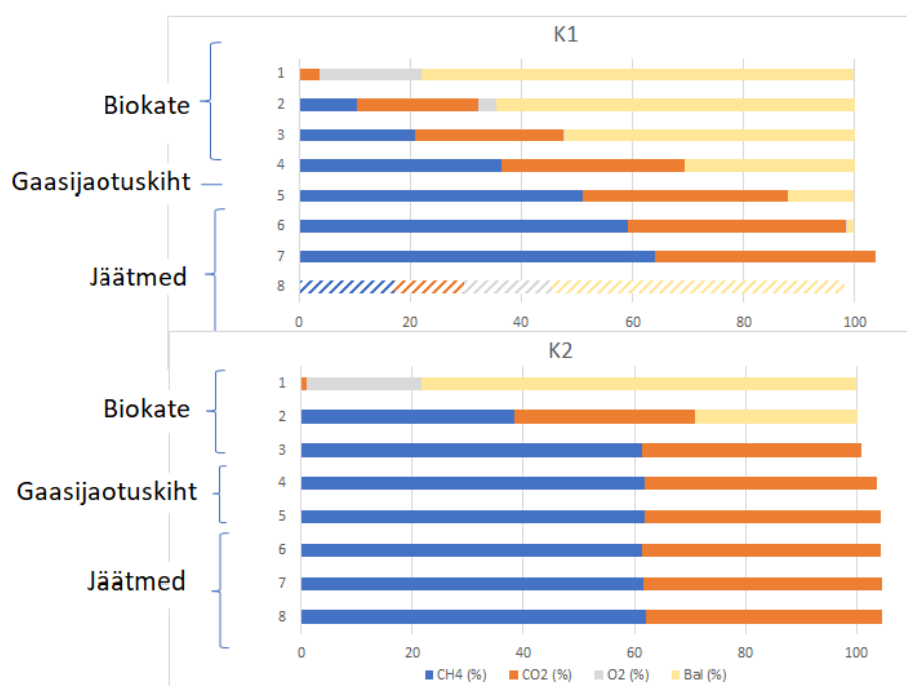
Jaanuarikuu mõõtmistulemustest on näha, et metaani sisaldus on mõlemas kaevu kõikides mõõtetasemetes väga kõrge (joonis 17, lisa 2, tabel 2.1). Kaevu K1 mõõtmistulemused jäid vahemikku 51,2 – 64,5% ja kaevu K2 17,9 – 64,5%. Süsihappegaasi esines samuti kõikidel mõõtetasemetel ja tulemused jäid kaevus K1 vahemikku 37,0 – 40,4% ning kaevus K2 0,8 – 43,2%. Hapniku sisaldus jaanuarikuus oli väga madal – mõlemas kaevus jäi tulemuse vahemikku 0,2 – 0,4%, ainult kaevu K2 kõige pinnapealsemas kihis oli hapniku sisaldus 8,3%.



Joonis 17. Kaevu K1 ja K2 jaanuarikuu mõõtmistulemused (%).

Tulemust mõjutab arvatavasti see, et kaevud olid hiljuti paigaldatud ning paigaldamise käigus keerati materjal segi. Õhuhapnik muutis vähemalt ülemised kihid korraks aeroobseks, mille indikaatoriks on temperatuuri tõus (viide hilisemale temp joonisele). Metaanilagundajad ei ole veel välja kujunenud, mida näitab metaani esinemine ülemistes kihtides. Hilisemate mõõtmiste korral on ülemistes kihtides metaani vähem, mis iseloomustabki metaani lagunemise toimumist.

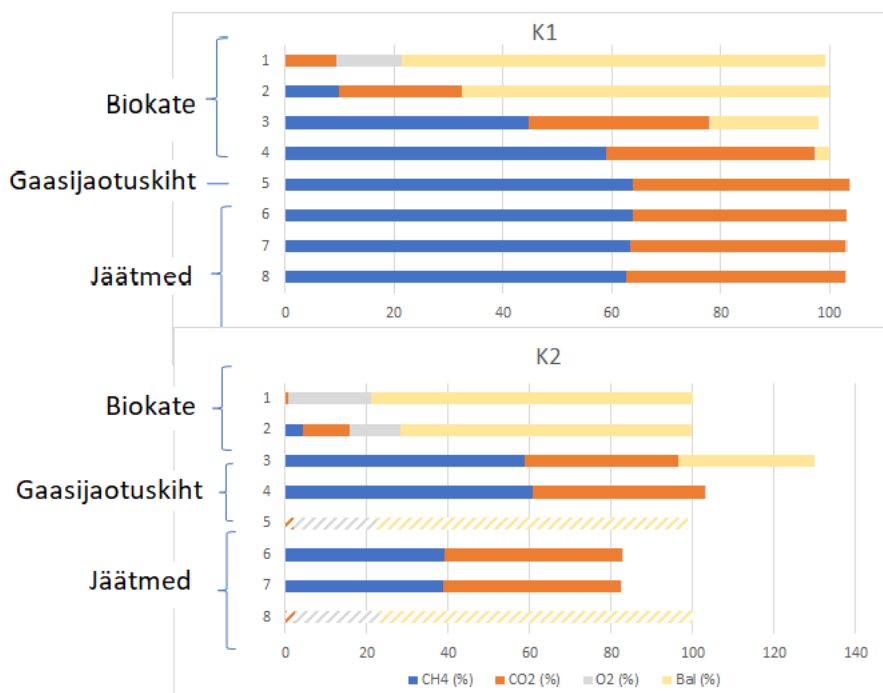
Veebruarikuus teostatud mõõtmisel saadi kõrge metaani sisaldus mõlema kaevu sügavamates kihtides ning pinnapealsemates kihtides oli metaani küllalki vähe (joonis 18). Sarnaselt metaanile esines kaevus K1 süsihappegaasi kõrgemates kihtides vähem ning sügavamates rohkem, kuid süsihappegaasis sisaldus oli kõrgemates kihtides suurem kui metaani sisaldus. Kaevu K2 tulemused oli sarnanesid jaanuarikuu tulemustega, kuid ülemistes kihtides oli näha süsihappegaasi sisalduse vähenemist (lisa 3, tabel 3.1). Mõlema kaevu hapniku sisaldus oli kõige kõrgem kõige pinnapealsemas kihis – nii K1 kui ka K2 oli sisalduseks 18,4%. Ülejäänud mõõtetasemetel oli mõlemas kaevus hapniku sisaldus madal.



Joonis 18. Kaevu K1 ja K2 veebruarikuu mõõtmistulemused (%).

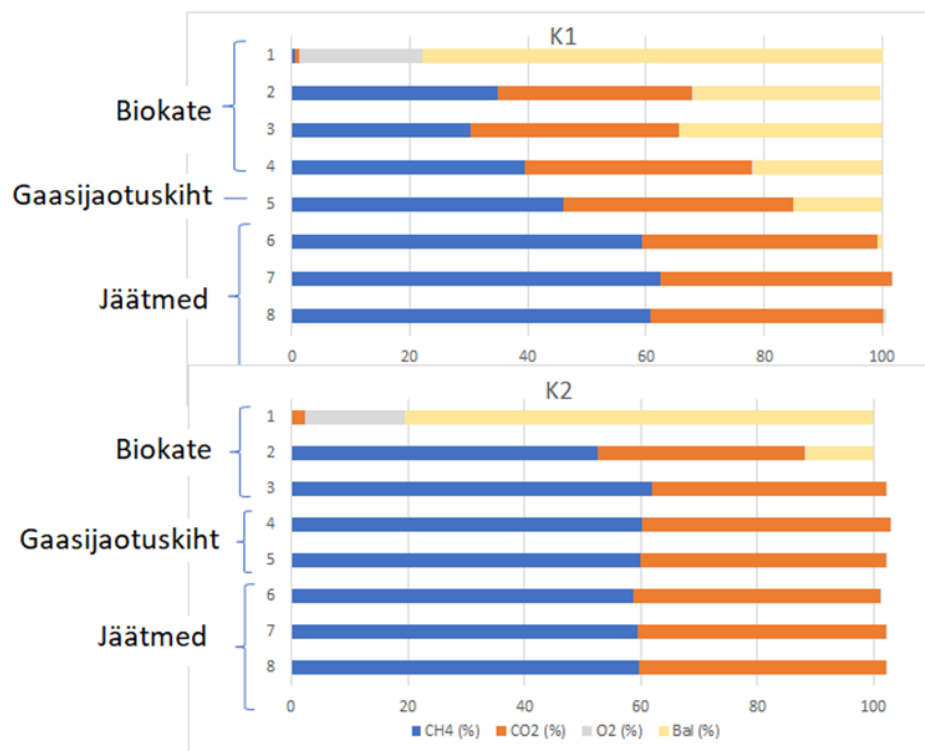
Aprillikuu mõõtmistulemustes saab näha, et võrreldes veebruarikuuga on metaani sisaldus kaevu K1 ülemistes kihtides tõusma hakanud (joonis 19). Kõige kõrgem metaani näitaja esines mõõtetasemetel 5 ja 6 – 63,9%, ehk metaani oli kõige rohkem gaasijaotuskihis ja prügis. Kaevus K2 olid kõige kõrgemad metaani sisaldused mõõtetasemetel 3 ja 4 (kattematerjalis ja tuhakihis) – vastavalt 58,8% ja 61,9%. Mõlema kaevu kõige pinnapealsemates kihtides (mõõtetasemed 1 ja 2) esines metaani kõige vähem. Süsihappegaasi sisaldus on kaevus K1 mõõtetasemetes 4 kuni 8 küllaltki sarnane, jäädes vahemikku 38,2 – 40,3%. Kaevus K2 jäi süsihappegaasi sisaldus samas vahemikus 42,3-

43,7% vahele. Ülemistes kihtides esines süsihappegaasi vähem. Mõlemal kaevul oli hapniku sisaldus kõige kõrgem mõõtetasemes 1 – kaevus K1 oli 12,1% ja kaevus K2 oli 20,4%, ülejäänud mõõtetasemetel oli hapniku sisaldus vahemikus 0,0 – 0,3%.



Joonis 19. Kaevu K1 ja K2 aprillikuu mõõtmistulemused (%).

Maikuus teostatud mõõtmisel saadi kaevu K1 kõige kõrgem metaani näitaja mõõtetasemel 7, milleks oli 62,5% (joonis 20). Ülemistes kihtides oli metaani sisaldus väiksem, välja arvatud mõõtetasemel 2, kus võrreldes aprilliga oli metaani sisaldus tõusnud – 35% peale. Kaevus K2 kõige kõrgem metaani sisaldus saadi mõõtetasemelt 3 (kattematerjalist), mille tulemuseks oli 61,9%. Sarnaselt aprilliga, pole mais süsihappegaasi sisaldus mõõtetasemetel 4 kuni 8 suuresti muutunud – kaevus K2 jääb süsihappegaasi sisaldus nendes sügavustes vahemikku 38,4 – 39,7% ning kaevus K2 42,3 – 42,7%. Kaevus K1 mõõtetasemel 3 oli süsihappegaasi sisaldus kõrgem kui metaani sisaldus. Sarnaselt eelmistele kuudele oli hapniku sisaldus kõige kõrgem esimeses mõõtetasemel ehk kõige pinnapealmises kihis. Hapniku sisaldus oli kaevus K1 20,6% ja kaevus K2 17,1%, ülejäänud mõõtetasemetel kõikis hapniku sisaldus 0,1 – 0,3 % vahel.



Joonis 20. Kaevu K1 ja K2 maikuu mõõtmistulemused (%).

Metaani bioloogiline lagundamine toimub seal, kus esineb korraga metaan ja hapnik (Abushammala *et al.* 2014:2). Süsihappegaasi esinemine kattekihis võib osutada elutegevusele organismide hingamise kaudu või metaani lagunemisele (Heinsoo 2016:46).

Huber-Humer *et al.* 2009 täheldasid oma uuringus, et talvel madalate temperatuuride juures nihkus oksüdatsioonikiht alla poole ning temperatuuri tõustes liikus oksüdatsioonikiht taas üles. Seega tuleb mõõtmisi korrata pikema aja vältel ning läbi aasta.

Tabel 4 . Ilmastikutingimused proovivõtu päevadel Jõelähtme prügilas

	02.10.	21.10.	02.12.	09.12.	20.01.	22.02.	05.04.
	2020	2020	2020	2020	2021	2021	2021
Õhutemperatuur öösel C°	9	1	2	-4	-5	0	2

Õhutemperatuur päeval C°	19	5	-2	-3	-9	1	3
Tuule suund	kirde-ida	ida	kagu-lõuna	ida	kagu-lõuna	lõuna-edel	lõuna
Tuule kiirus m/s	1	4	2,5	2	4,5	5	6
Suhteline õhuniiskus %	43-91	94-100	83-97	64-69	80-95	100	43-95

Varasematest uuringutest perioodil 2018 – 2019 Uikalas selgub, et süsihappegaasi sisaldus jäi katsealal (sügavus kuni 1,2 m) 0-20 mm vahemikku 0,1 – 33,4% ja katsealal 0-40 mm vahemikku 0,9-33,4% (Tsibernaja 2019: 24). Perioodil 2019 – 2020 oli süsihappegaasi sisaldus katsealal 0-20 mm vahemikus 1,4 – 25,4% ning 0-40 mm vahemikus 1,6-21,1% (Prangli 2020: 29). Käesoleva töö süsihappegaasi tulemused on kõrgemad, kui Uikalas saadud tulemused, aga ka prügila on oluliselt suurem. Mõlema kaevu tulemustest on näha, et perioodil veebruar – mai süsihappegaasi sisaldus kõige ülemistes kihtides vähenenud. See tingitud sellest, et pinnapealsemas kihis pääseb õhk juurde (Prangli 2020: 29). Mõlemas võrreldud prügilas on aktiivne gaasikogumissüsteem, kuid selle gaasikollektorite mõjuulatus ei ole teada.

Mõõtmistulemused näitavad ootuspäraselt, et metaani esineb sügavamatel mõõtetasemetel kõige enam ja kõige pinnapealsemates kihtides kõige vähem. Selleks, et ka sügavamatel kihtidel tõhustada metaani lagundamist, võiks kaaluda hapniku viimist sügavamale. Üheks selliseks viisiks on kihi õhustamine, mille käigus puhutakse õhku lademesse eesmärgiga kiirendada jäätmete lagundamise protsessi (Ritzkowski, Stegmann 2012).

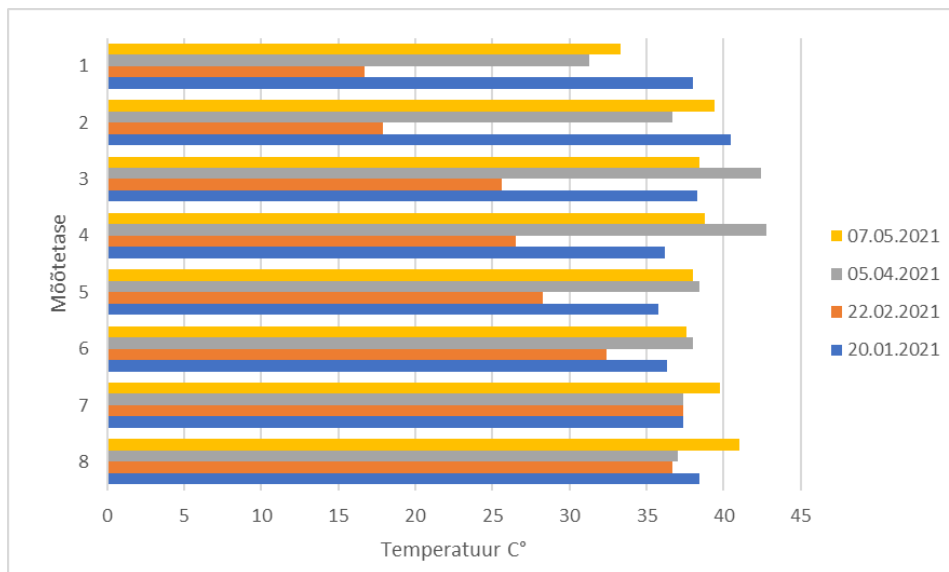
3.3. Temperatuur kattekihi sees

Mõlema kaevu temperatuur on üldjoontes sama, kuid kaevu K2 temperatuur on kohati kõrgem kui K1. Kaevu K1 temperatuur jäi vahemikku +16,7 kuni +42,8 °C. Kaevu K2

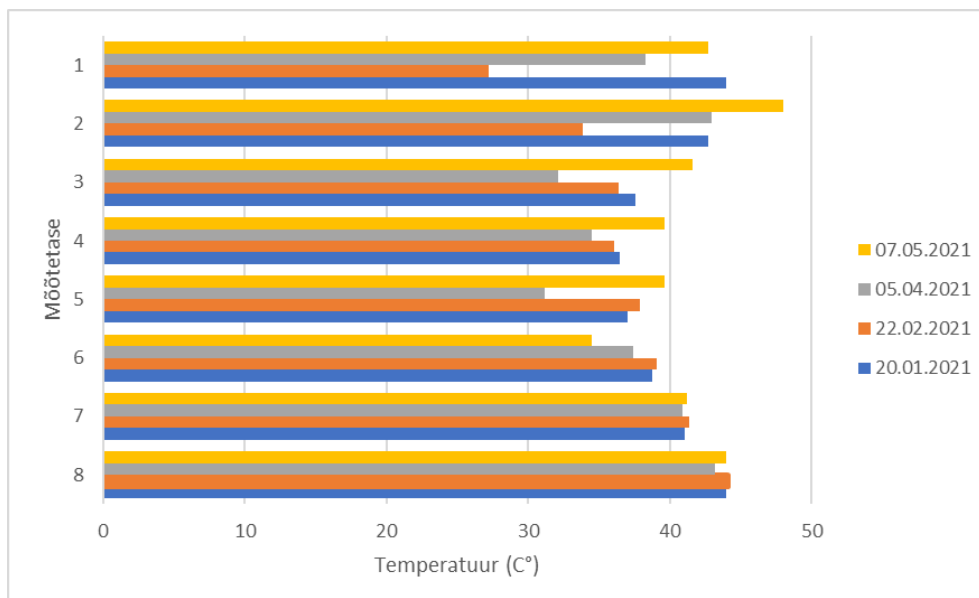
temperatuur jäi vahemikku + 27,2 kuni +44,1 °C. Joonistel 21 ja 22 on kujutatud vastavalt kaevude K1 ja K2 temperatuuri erinevatel mõõtetasemetel.

Jaauarikuus toimunud mõõtmisel jäi kaevu K1 temperatuur vahemikku +35,8 kuni +40,5 °C (joonis 21). Kõige madalam temperatuur oli 2,3ddeetri sügavusel (mõõtetase 5) ning kõige kõrgem temperatuur oli 0,91 meetri sügavusel (mõõtetase 2). Veebruarikuu mõõtmistulemustest on näha, et temperatuur oli kõrgem sügavamates kihtides ja pinnapealsemates kihides oli temperatuur madalam – kõige kõrgem temperatuur oli 3,26 meetri sügavusel. Aprillis läbiviidud mõõtmisel saadud tulemustest on näha, et kattekihi keskel, 1,86 meetri peal, oli temperatuur kõige kõrgem – +42,8 °C. Maikuu tulemustest on näha, et kõikumisi erinevate sügavuste vahel ei olnud nii palju. Tulemused jäävad vahemikku +33,3 kuni +41 °C – kõige kõrgem temperatuur oli 3,58 meetri sügavusel, kõige madalam temperatuur oli 0,44 meetri sügavusel.

Kaevus K2 jäid temperatuurid jaauaris vahemikku +36,5 kuni +44,0°C, kusjuures sügavustel 0,34 meetrit ja 3,71 meetrit mõõdeti samad tulemused (+44,0°C) (joonis 22). Veebruaris toimunud mõõtmisel jäid temperatuurid vahemikku +27,2 kuni 44,1°C. Kõrgemad temperatuurid olid sügavamates kihtides, madalamates ja keskmistes kihtides olid temperatuurid madalamad. Aprillis toimunud mõõtmisel saadud mõõtmistulemustest olid näha, et temperatuur kõigub erinevate sügavuste vahel. Kõige kõrgem temperatuur oli 0,82 meetri sügavusel (+43°C) ning kõige madalam oli 2,38 meetri sügavusel (+31,2°C). Maikuu tulemused jäid vahemikku +34,5 kuni +48,0°C. Kõige kõrgem temperatuur oli 0,82 meetri sügavusel ja kõige madalam temperatuur oli 2,82 meetri sügavusel.



Joonis 21. Temperatuur kaevu K1 erinevatel mõõtetasemetel (C°).



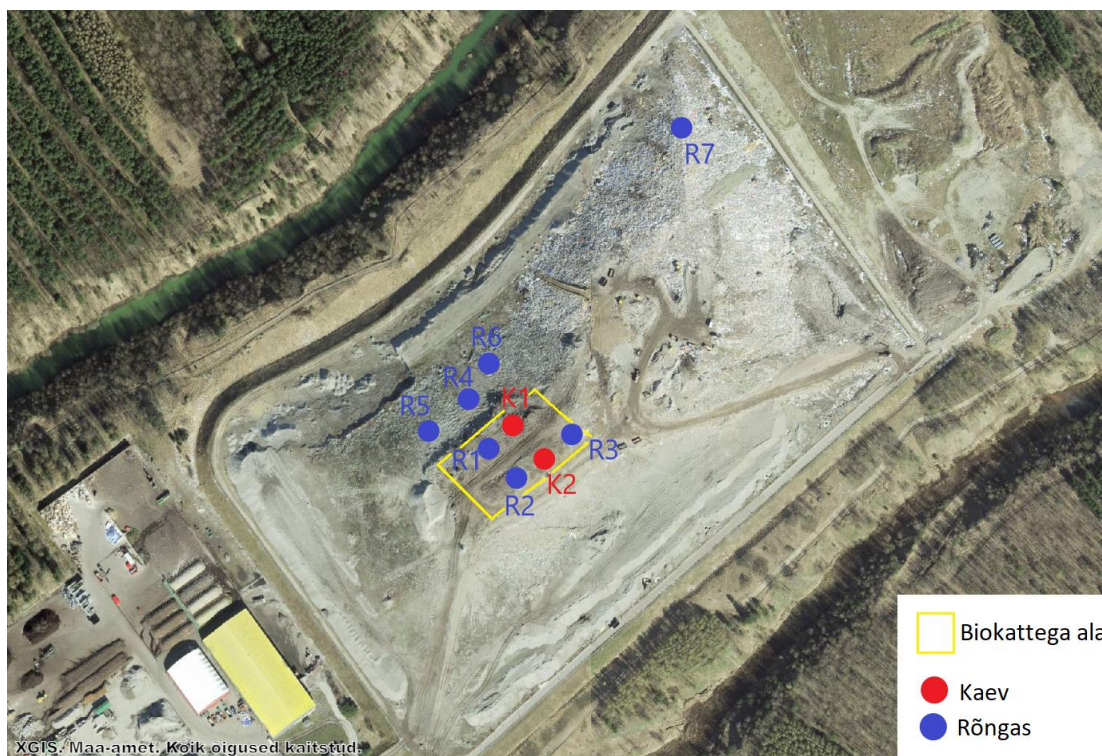
Joonis 22. Temperatuur kaevu K2 erinevatel mõõtetasemetel (C°).

Kõige madalam temperatuur kattekihi sees fikseeriti veebruaris teostatud mõõtmisel, mil välistemperatuur oli +1C° ja mõõtmisele eelnenud kolme päeva ööpäevakeskmise oli -9,6 C° (Riigi Ilmateenistus 2021) ning temperatuur oli alla nulli. Mõlema kaevu ülemistes kihtides olid temperatuur madalaim, mis oli tingitud väljas olevast ilmastikust. Zeiss (2006:291) leidis uuringus, et lume sulamise tõttu kattekihi sisse imbinud külm vesi viib kattematerjali jahenemiseni. Ilmade soojenedes temperatuur taastus, mis näitab kas jäätmetest lähtuva soojuse levimist ülespoole.

Perioodil 2019 – 2020 mõõdeti Uikalas 0-40 mm fraktsiooniga katsealal temperatuuri vahemikus +5 kuni +42 °C ja 0-20 mm fraktsiooniga katsealal +4 kuni +45 °C (Prangli 2020: 30). Uikalas saadud tulemused on sarnased käesoleva tööga saadud tulemustega.

3.4. Metaani sisaldus kattekihi ja prügila pinnal

Metaani sisaldust mõõdeti seitsmest kohast – kolm rõngast paikneb biokattega alal (R1, R2 ja R3) ja neli rõngast paikneb avatud prügila pinnal (R4, R5, R6 ja R7) (joonis 23). Tabelis 3 on toodud proovivõtu graafik, kus ristiga on tähistatud kuupäevad, millal milliselt rõngalt proove on võetud.

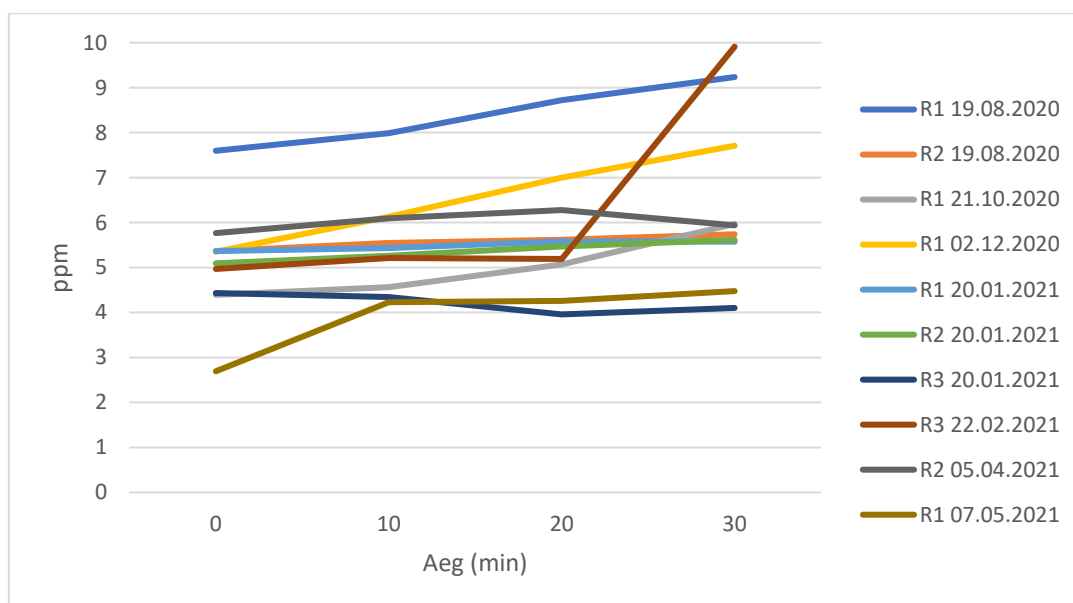


Joonis 23. Proovivõtu punktid.

Mõõtmistel saadud tulemused on jagatud metaani sisalduse järgi kolmeks: kuni 10 ppm, kuni 25 ppm ja kuni 115 ppm ning esitatud eraldi joonistena. Eraldi joonisena on esitatud rõnga

R6 ja kõik R4 tulemused, sest neis oli metaani sisaldus väga kõrge. Tulemused on esitatud ühikus ppm ehk *parts-per-million* (lisa 4, tabel 4.1) (10^{-6} , 10 000 ppm = 1

Joonisel 24 on esitatud mõõtmistulemused pinnalt, millel oli metaani sisaldus kuni 10 ppm'i. Nagu tulemustest näha, siis kõik tulemused, mille metaani sisaldus oli kuni 10 ppm'i, pärinevad biokattega alalt. Kõige kõrgem tulemus rõngalt R1 on saadud augustis teostatud mõõtmisel, kus 0 minutil oli metaani sisaldus 7,60 ppm'i ja 30 minuti möödudes oli 9,24 ppm'i. See on ka kõige kõrgem tulemus. Rõngalt R2 kõige kõrgem väärtus oli aprillis teostatud mõõtmisel, kus 0 minutil oli metaani sisaldus 5,77 ppm'i. Kõige kõrgem väärtus rõngal R3 oli jaanuaris teostatud mõõtmisel, kus 0 minutil oli metaani sisaldus 4,43 ppm'i.

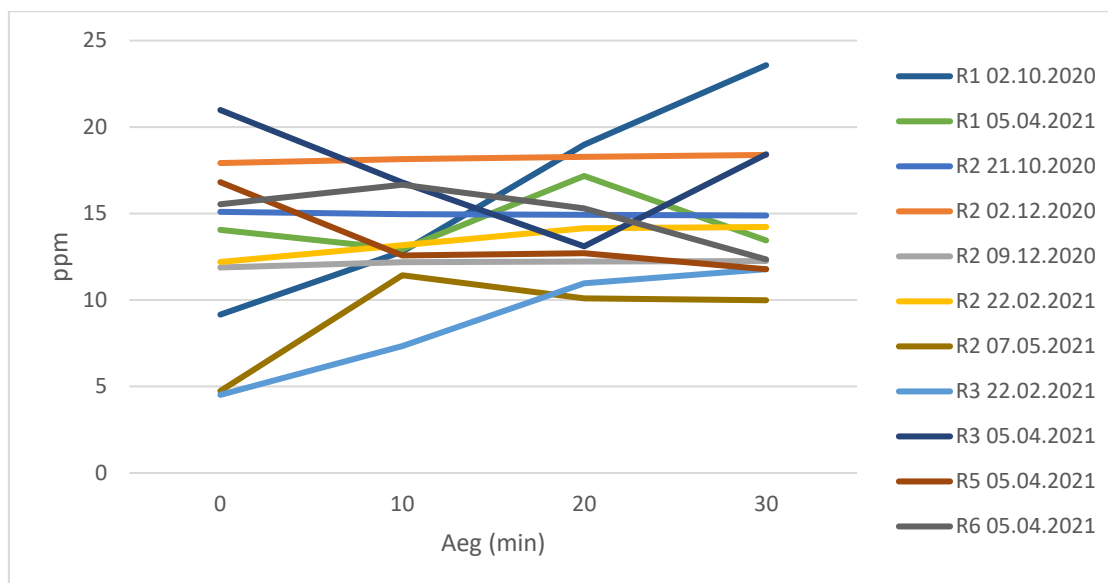


Joonis 24. Mõõtmistulemused, mille metaani sisaldus oli kuni 10 ppm'i.

Joonisel 25 on esitatud mõõtmistulemused, mille metaani sisaldus oli kuni 25 ppm'i. Valdavalt pärinevad kõik tulemused biokattega alalt. Kaks tulemust on saadud ka avatud prügila pinnalt (R5 ja R6).

Kõige kõrgem metaani sisaldus on mõõdetud oktoobrikuus rõngalt R1. Seal mõõdeti metaani sisalduseks 0 minutil 9,16 ppm'i ja 30 minuti möödudes oli see 23,58 ppm'i. Rõnga R2 kõige kõrgem metaani sisaldus saadi detsembris ning see jäi vahemikku 17,92 – 18,39 ppm'i. R3 rõngalt saadud tulemustest kõige kõrgem metaani sisaldus saadi veebruaris, mil 0 minutil mõõdetud tulemus oli 20,99 ppm'i ja 30 minutil 18,43 ppm'i.

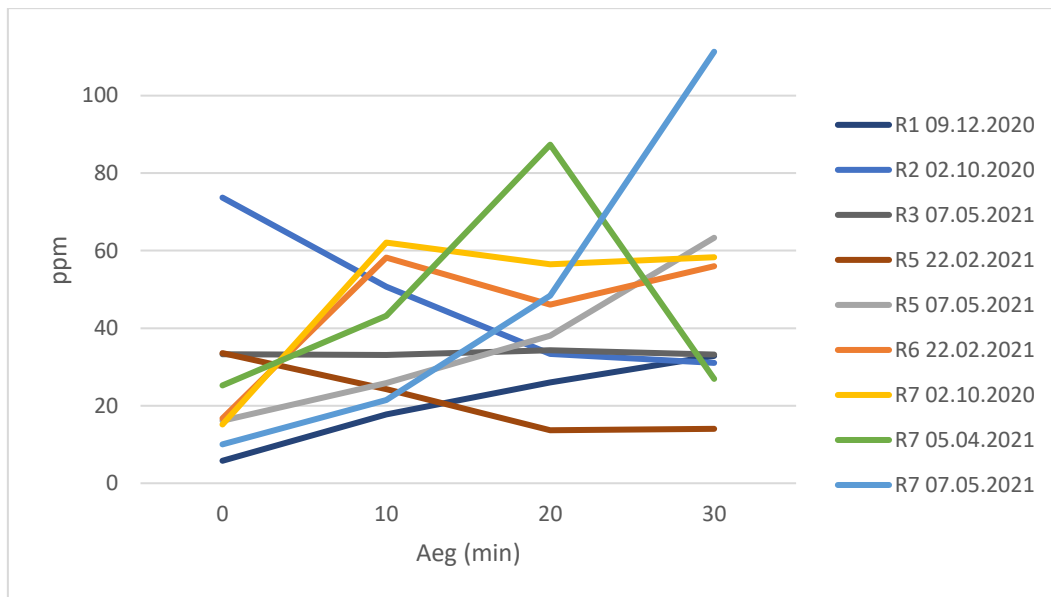
R5 ja R6 tulemused olid 0 minutil vastavalt 16,81 ppm'i ja 15,53 ppm'i.



Joonis 25. Mõõtmistulemused, kus metaani sisaldus oli kuni 25 ppm'i.

Joonisel 26 on kujutatud mõõtmistulemused, mille metaani sisaldus oli kuni 115 ppm'i. Kolm tulemust pärineb biokattega alalt ja ülejäänud pärinevad avatud prügila pinnalt paigaldatud rõngastelt. Kuigi biokattega alale paigaldatud rõngad andsid kõrge metaani sisalduse tulemuse, siis jäävad need alla prügila pinnalt saadud tulemustele.

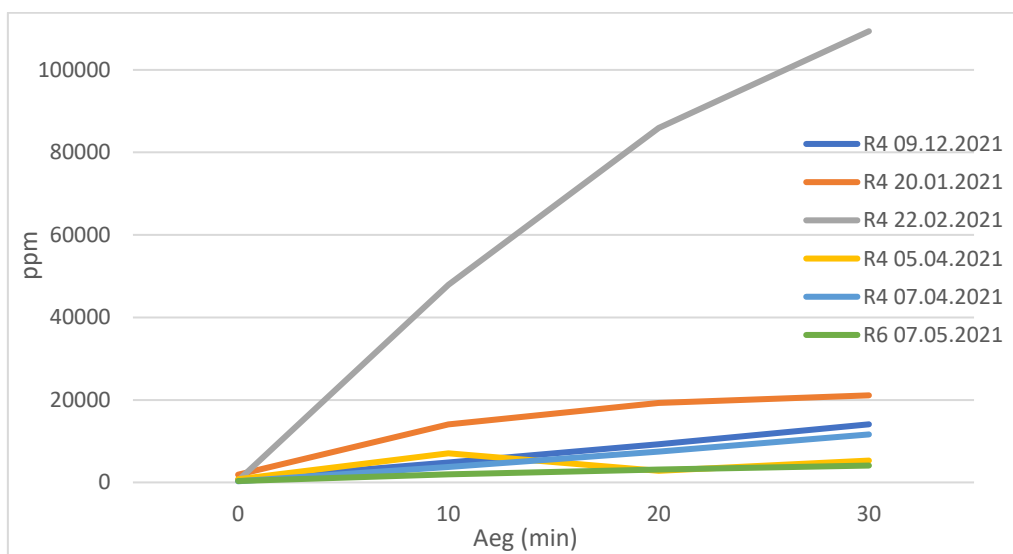
Kõige kõrgem metaani sisaldus pärineb rõngalt R7, kus 0 minutil tehtud mõõtmisel saadi tulemuseks 10,03 ppm'i ning 30 minuti möödudes 111,32 ppm'i. Biokattega alalt pärit rõngaste R1, R2 ja R3 tulemused olid 0 minutil vastavalt 5,80 ppm'i, 73,69 ppm'i ja 33,26 ppm'i. Rõnga R5 maksimum tulemus mõõdeti maikuus, kus 0 minutil saadi tulemuseks 33,58 ppm'i. Rõnga R6 kõrgeim tulemus mõõdeti veebruaris ja 0 minutil oli tulemus 16,74 ppm'i ning 30 minuti möödudes 55,97 ppm'i



Joonis 26. Mõõtmistulemused, kus metaani sisaldus oli kuni 115 ppm'i.

Rõngas R4 on kogu mõõtmisperioodil andnud väga kõrgeid tulemusi. Maikuu mõõtmisel andis väga kõrge tulemuse rõngas R6. Seetõttu on need tulemused esitatud eraldi joonisel (joonis 27).

Esmane mõõtmine punktis R4 sai tehtud detsembrikuus. Mõõtmistulemustest on näha, et punktis R4 on metaani sisaldus väga kõrge – 0 minutil võetud proovi tulemus oli 659,11 ppm ning 30 minuti möödudes oli metaani sisaldus 14086,33 ppm (joonis).



Joonis 27. Rõnga R4 ja R6 metaani sisaldus avatud prügila pinnal (ppm).

Kõige kõrgem metaanis sisaldus rõngalt R4 on mõõdetud veebruari kuus, mil 0 minutil mõõdetud tulemus oli 449,21 ppm'i ning 30 minuti möödudes oli see 109 377,05 ppm'i. See on ka kõige kõrgem metaani sisaldus, mis prügilas uuringu jooksul mõõdeti. Keskmise metaani sisaldus rõngal R4 perioodil detsember 2020 – mai 2021 oli 18 395,24 ppm'i. Mõõtmistulemuste põhjal tundub, et rõngas R4 on paigaldatud kohta, kuhu gaas koguneb.

Maikuu mõõtmisel andis rõngas R6 ebatavaliselt kõrge metaani sisalduse. Võrreldes aprillikuu keskmise mõõtmistulemusega erines maikuu keskmine mõõtmistulemus 159,5 korda. Mõõtmisviga ei tuvastatud.

Metaani eraldub nii biokattega alal kui ka avatud prügila pinnalt. Tulemustest on näha, et biokattega alal mõõdetud metaani sisaldus on palju väiksem kui avatud prügila pinnal. Biokatte sees esineb metaani, kuid pinnale lähenedes selle sisaldus väheneb. Seega saab käesoleva tööga tehtud mõõtmiste põhjal öelda, et biokate toimib.

KOKKUVÕTE

Prügilast eralduv gaas on kahjulik nii keskkonnale kui ka inimeste tervisele. Prügilagaasi peamiseks koostiseks on metaan, mis on võimas kasvuhoonegaas. Prügilatel on kohustus ladestusalalt eralduvat gaasi koguda, kuid väikeste koguste juures on see tihtipeale ebaefektiivne. Biokatte ehk metaanilagunduskatte rajamine vähendaks metaani emissiooni, sest metaani lagundamine toimuks bioaktiivse kihi sees. Lisaks on sellise katte rajamine hea näide ringmajanduse põhimõtete rakendamisest, sest kattematerjal pärineb üldjuhul prügilast.

Käesoleva magistritöö eesmärk oli uurida Jõelähtme prügilasse rajatud biokatte tõhusust metaani lagundamisel. Töö raames määrati biokattes ja gaasijaotuskihis kasutatava materjali omadused. Materjal sõeluti ning sorditi ka käsitsi koostisosade tuvastamiseks.

2020. aasta detsembris paigaldati biokattega alale kaks kaheksast eri pikkusega torust ja horisontaalsest filtrist koosnevat gaasiseirekaevu. See võimaldas mõõta gaaside koostist poolemeetrisel sammuga kuni nelja meetri sügavuseni. Mõõtmiseks kasutati kaasaskantavat gaasianalüsaatorit GA5000. Mõõtmisi teostati iga nelja nädala tagant ja töö käigus tehti neli mõõtmist.

Läbi kattekihi pinna ja läbi prügila katmata ala lenduva prügilagaasi sisalduse määramiseks paigaldati seitse püsivat mõõterõngast. Proove võeti mõõterõngastelt suletud kambri meetodil, kuhu paigaldati mõõtmise ajaks gaasikogumiskuppel. Gaasi koguti vakumeeritud pudelitega iga kord 0, 10, 20 ja 30 minutil. Töö käigus tehti mõõterõngastest kolm kuni üheksa mõõtmist.

Biokatte tõhusa töö eelduseks on hästi töötav gaasijaotuskiht. Jõelähtme prügila gaasijaotuskiht on valmistatud jäämepõletusettevõtte koldetuhast. Sõelumistulemused summeeriti kuni 8 mm ja üle selle, olles vastavalt 73,8% ja 26,2%. Gaasijaotuskihis sobib paremini kasutada jämedakoelist materjali, seega tasuks peenemad osakesed välja sõeluda.

Biokatte materjal sõelumise tulemused summeeriti kuni 8 mm ja üle selle, olles vastavalt 22,2% ja 77,8%. Peenfraktsiooni oli analüüsitud proovis vähe.

Biokattes oli plasti 41,3%. See oli enamjaolt suurem kui 8 mm. Plasti osatähtsust tasuks vähendada, et vältida olukorda, kus kokku pressitud kiletükikesed võiks hakata takistama gaasi liikumist.

Erinevate gaaside sisaldust biokattega alalt mõõdeti kahest kaevust – K1 ja K2. Prügi sisse ulatuvates mõõtetorudes leidis metaani kaevus K1 vahemikus 59,2 – 64,5% ning kaevus K2 38,8 – 62,1% ja hapnikku leidis neis kihtides väga minimaalselt. Gaasijaotuskihis jäi metaani sisaldus kaevus K1 vahemikku 46,1 – 64,2% ja K2 59,9 – 61,9%. Biokattes olevates mõõtetorudes oli metaani vähem pinnalähedases kihis ning samas täheldati hapniku olemasolu. Mõõtmistulemustest on näha, et hapnik tungib kaevus K1 vähemalt 0,91 meetri sügavusele ja kaevus K2 vähemalt 0,82 meetri sügavusele. Selleks et hapniku sisaldus sügavamates kihtides suurendada, tuleks neid õhustada.

Nii biokattega alalt kui ka avatud prügila pinnalt eraldus metaani. Biokattega ala pinnal kõige kõrgem metaani sisaldus, mis uuringu perioodil mõõdeti, oli 73,69 ppm'i. Avatud prügila pinna kõige kõrgem metaani sisaldus oli 109 377,05 ppm'i. See näitab, et avatud prügila pinnal on metaani sisaldus väga palju kõrgem kui biokattega ala pinnal. Tulemuste põhjal saab öelda, et metaanilagunduskate töötab, sest metaani sisaldus biokattega alal on palju väiksem kui prügila pinnal. Tulemusi tuleb kontrollida ajas, sest käesoleva töö mõõtmised on suuresti tehtud talvel-kevad. Lisaks tuleks tihendada seirevõrgustikku, et avastada prügila või bioakna pinnal lekkeid.

Õige tehnoloogia rakendamisega on võimalik jäätmesektoris saada kiiresti häid tulemusi. Metaanilagunduskatte rajamine on suhteliselt odav ja tehniliselt kergesti teostatav, mis omakorda aitab kaasa Euroopa Liidu metaanistrateegia ja roheleppe eesmärkide täitmisele.

SUMMARY

Gas that is emitted from a landfill is harmful to the environment and to peoples' health. The main component of landfill gas is methane, which is also a powerful greenhouse gas. It is mandatory to collect gas from landfills, but when gas production is too low to collect, it becomes economically inefficient. Covering a landfill with a methane degradation layer, also known as biocover, would reduce methane emissions, because methane would degrade inside the bioactive layer. Constructing such a layer is a great example of implementing circular economy principles, because usually the material for the cover layer comes from the same landfill.

The aim of this Master's thesis was to study the efficiency of Jöelähtme landfills' methane degradation layer. During the study, samples were taken from the biocover and gas distribution layer to determine its features. Both materials were sieved and sorted to identify components.

The test site was constructed at the top of the landfill and it was covered with methane degradation layer. In December 2020, two gas wells consisting of 8-level horizontal pipes with gas collection filters were installed there. The length of the pipes ranged from 0,5 meters to 4 meters. That way it was possible to measure methane content in different depths. A portable gas analyser GA5000 was used measure gas content every four weeks. During the study methane content was measured four times.

To measure landfill gas concentration from the cover layer and waste, seven stationary rings were installed. Surface gas was measured by using closed chamber method, where a chamber was placed inside the ring and sealed with water. Gas was collected into vacuumed bottles every 0, 10, 20 and 30 minutes. During the study, gas was collected from the rings three to nine times, depending on the ring.

For methane degradation layer to work, it is important to have a well-constructed gas distribution layer. The gas distribution layer at Jöelähtme landfill is made of ash from a waste incineration plant. The results from sieving the ash from gas distribution layer show that 73,8% of the sieved material was smaller than 8 mm and 26,2% was bigger than 8 mm. It is

better to use coarse material in the gas distribution layer, so it would be wise to sieve out the fine fraction.

The results from sieving the biocover material showed that 22,2% of the sieved material was smaller than 8 mm and 77,8% was bigger than 8 mm.

The results of sorting the biocover material showed that 41,6% of it was plastic. Most of it was bigger than 8 mm. It would be wise to reduce plastic in the cover, because if plastic is pressed together it may cause disruption in gas flow.

The content of different gases inside the biocover was measured from two gas wells – K1 and K2. In gas well K1 the methane content in pipes that reached to the waste layer was between 59,2 – 64,5% whereas in gas well K2 methane content at the same level was between 38,8 – 62,1% and oxygen in those levels was nearly nonexistent. Methane content in gas distribution layer in gas well K1 was between 46,1 – 64,2% and in gas well K2 59,9 – 61,9%. The pipes that were installed inside the methane degradation layer and were closest to the surface showed little methane but also quite a lot of oxygen. Results show that in gas well K1 oxygen penetrates at least 0,91 meters deep and in gas well K2 at least 0,82 meters deep. In order to increase oxygen content in the lower part of the biocover, landfill aeration should be considered.

Both the biocover and open landfill emit methane. The highest concentration that was measured during this study from the surface of the biocover was 73,69 ppm (parts-per-million), whereas open landfills' highest methane concentration was 109 377,05 ppm. It shows that a lot of methane is emitting from the open landfill. Based on the results of this study it can be said that methane degradation layer does work, as content of methane is much smaller on top of the biocover. These results should be checked over time, as most of the field work was done during winter-spring. It would also be wise to expand monitoring to discover surface leakages on the biocover and open landfill.

KASUTATUD KIRJANDUS

7-Mile Landfill Operational Biocover Study (2020). Regional District of Mount Waddington, British Columbia. Sperling Hansen Associates.

Abushammala, M. F. M., Basri, N. E. A., Irwan, D., Younes, M. K. (2014). Methane Oxidation In Landfill Cover Soils: A Review – *Asian Journal of Atmospheric Environment* Vol. 8-1, pp 1-14

ATSDR. (2001). Agency for Toxic Substances & Disease Registry. Chapter 2: Landfill Gas Basics. [veebileht] <https://www.atsdr.cdc.gov/hac/landfill/html/ch2.html> (18.01.2021)

Barlaz, M. A., Green, R. B., Chanton, J. P., Goldsmith, C. D., Hater, G. R. (2004). Evaluation of a Biologically Active Cover for Mitigation of Landfill Gas Emissions – *Environmental Science & Technology* Vol. 38, 4891- 4899 pp

Chapman, M., Antizar Ladislao, B. (2013). Biotic landfill CH₄ emission abatement using bio-waste compost as a landfill cover. – *Agriculture and Food Science Research Summaries* pp 55-80

Christophersen, M., Linderoed, L., Jensen, P., & Kjeldsen, P. (2000). Methane oxidation at low temperatures in soil exposed to landfill gas. - *J. Environ. Qual.*, 29, 1989–1997

Chavan, D., Kumar, S. (2018). Reduction of methane emission from landfill using biocover as a biomitigation system: A review. – *Indian Journal of Experimental Biology*. Vol 56, pp 451- 459

Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R. B., Piao, S., Thornton, P. (2013). *Climate Change 2013: Physical Science Basis. Change Carbon and Other Biochemical Cycles. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom ja New York, NY, USA.

Direktiiv 1999/31/EÜ. Nõukogu direktiiv, 26.aprill 1999, prügilaste kohta [veebileht] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=celex%3A31999L0031> (20.03.2021)

Direktiiv 2008/98/EÜ. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv, 19.november 2008, mis käsitleb jäätmeid ja millega tunnistatakse kehtetuks teatud direktiivid (EMPs kohaldatav tekst) [veebileht] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098> (20.03.2021)

Direktiiv 2018/850. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv, 30.mai 2018, millega muudetakse direktiivi 1999/31/EÜ prügilate kohta (EMPs kohaldatav tekst) [veebileht] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0850&qid=1616954861955>

(20.03.2021)

EEA. (s.a). European Environment Agency. Term: Landfill gas. [veebileht] <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/gemet-environmental-thesaurus/landfill-gas> (18.01.2021)

EEA. (2019).European Environmental Agency. Indicator Assessment: Diversion of waste from landfilling. [veebileht] <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/diversion-from-landfill/assessment> (14.05.2021)

Einola, J. (2010). Biotic Oxidation of Methane in Landfills in Boreal Climatic Conditions. Academic dissertation. University of Jyväskylä. Jyväskylä studies in biological and environmental science 208.

Euroopa roheline kokkulepe COM (2019) 640 final (2019). Euroopa Komisjoni teatis Euroopa Parlamendile, Nõukogule, Euroopa Majandus- ja Sotsiaalkomiteele ning regioonide komiteele Euroopa rohelse kokkuleppe kohta [veebileht] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588580774040&uri=CELEX:52019DC0640> (22.05.2021)

European Commission – Questions and answers. (2020) Questions and answers: An EU Methane Strategy [veebileht] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_1834 (28.03.2020)

EUROSTAT news. (2020). Greenhouse gas emissions from waste [veebileht] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20200123-1> (23.04.2021)

EPA. (s.a). United States Environmental Protection Agency. Overview of Greenhouse Gases. [veebileht] <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> (18.01.2021)

Gebert, J., Huber-Humer, M. (2021). Methane oxidation systems to mitigate landfill gas emissions from landfills; Webinar at the Sardinia Academy of Waste Management, hosted by the IWWG-TG CLEAR

Geotech. (2020). GA5000 Gas Analyser Operating Manual. <https://www.hydroterra.com.au/assets/Uploads/GA5000-Operating-Manual.pdf>

Heinsoo, M. (2016). Kudjape prügila metaanilagunduskatte uuring. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu. 91 lk.

***Huber-Humer, M., Lechner, P.** (2001). Design of a landfill cover layer to enhance methane oxidation; results from a two year field investigation In: Proceedinf of SARDINIA 2001-Eighth international waste management and landfill symposium, Cagliari viidatud: **Chavan, D., Kumar, S.**

(2018). Reduction of methane emission from landfill using biocover as a biomitigation system: A review. – Indian Journal of Experimental Biology. Vol 56 vahendusel

Huber-Humer, M., Gebert, J., Hilger, H. (2008). Biotic systems to mitigate landfill methane emissions – *Waste Management & Research* No 26 33-46 pp

Huber-Humer, M., Röder, S., Lechner. (2009). Approaches to assess biocover performance on landfills. – *Waste Management* No 29 2092-2104 pp

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Toim. Edenhofer, O., Pich-Madruga, R., Sokona, Y., Minx, J.C., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom ja New York, NY, USA.

Keskkonnaamet (2019). Keskkonnakompleksluba. https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?represented_id=&search=1&permit_nr=&owner_name=&issue_date_start=&issue_date_end=&valid_start_date_start=&valid_start_date_end=&permit_type=IEP&search_location=37&permit_status=ISSUED&permit_id=114240 (10.02.2021)

Keskkonnaministeerium (2018). Kasvuhooneefekt ja kasvuhoonegaasid. [veebileht] <https://www.envir.ee/et/kasvuhooneefekt> (18.01.2021)

Keskkonnaministeerium (2020). Jäätmed. [veebileht] <https://www.envir.ee/et/jaatmed> (21.04.2021)

Kettunen, R.H., Einola, J.-K. M., Rintala, J.A. (2006). Landfill Methane Oxidation in Engineered Soil Columns at Low Temperature – *Water, Air and Soil Protection* 177: 313-334

Kriipsalu, M., Maastik, A., Truu, J. (2016). Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus. 376 lk.

Maa-amet (2021). Maa-ameti kaardirakendus. [veebileht] <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo> (16.05.2021)

Metaaniheite vähendamise strateegia COM (2020) 663 final. (2020). Komisjoni teatis Euroopa Parlamendile, Nõukogule, Euroopa Majandus- ja Sotsiaalkomiteele ning regioonide komiteele metaaniheite vähendamise ELi strateegia kohta [veebileht] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0663&from=EN> (17.03.2021)

Nunez, C. (2019). Carbon dioxide levels are at a record high. – National Geographic. [veebileht] <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/greenhouse-gases/> (22.01.2021)

Prügila rajamise, kasutamise ja sulgemise nõuded. (vastu võetud 29.04.2004, jõustumine 08.05.2004). – Riigi Teataja <https://www.riigiteataja.ee/akt/792837?leiaKehtiv> (18.01.2021)

Prangli, K.-K. (2020). Metaanilagunduskatte efektiivsuse uuring Uikala prügilas. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu. 52 lk.

Projekteerija arvamus, MK Konsultatsioonid. (2020). Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskuse Ladestusala Kattekonstruktsioonist

Riigi Ilmateenistus. (2021). Vaatlusandmed. Ööpäevakeskmise. [veebileht] <https://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/oopaevaandmed/> (24.05.2021)

Ritzkowski, M., Stegmann, R. (2012). Landfill areation worldwide: Concepts, indications and findings. - *Waste Management*. Vol32 (7), 1411-1419 pp

***Rettenberger, G.** (2004). Untersuchungen zur Charakterisierung der Gasphase in Abfallablagerungen, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 82, Kommissionsverlag Oldenbourg Industrieverlag viidatud: **Wagner, J.-F., Rettenberger, G., Reinert, P.** (2007). Modern landfill technology – Landfill behavior of mechanical-biological pre-treated waste vahendusel.

Scheutz, C., Kjeldsen, P. (2004). Environmental Factors Influencing Attenuation of Methane and Hydrochlorofluorocarbons in Landfill Cover Soils – *J. Environ. Qual.* Vol 33, 72-79 pp

Scheutz, C., Pedersen, R.B., Petersen, P.H., Jorgensen, J.H.B., Ucendo, I.M.B., Monster, J.G., Samuelsson, J., Kjeldsen, P. (2014). Mitigation of methane emission from an old unlined landfillin Klintholm, Denmark using a passive biocover system. – *Waste Management* 34. 1179-1190 pp

Sellik, S. (2018). Sillamäe prügila metaanilagunduskatte uuring. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu. 76 lk.

Stern, J.C., Chanton, J., Abichou, T., Powelson, D., Bogner, J. (2007). Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. – *Waste Management* No 27 (2007), pp 1248-1258

Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus AS keskkonnaaruanne. (2019). Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus AS keskkonnaaruanne. https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/emas_aruanne_tjt_2019_kohta_0.pdf (03.04.2021)

Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskuse ladestusala kattekonstruktsioon Lisa 1. (2017). Koostaja: OÜ MK Konsultatsioonid

TJT Jöelähtme prügila sulgemine passiivse metaanilagundustehnoloogia rakendamise abil. (2020). Dokument: eksperdi arvamus.

TJT Tallinna prügila bioakna uuringud. (2021). Tartu: Eesti Maaülikooli tööühm.

Tchobanoglous, G., Kreith, F. (2002). Handbook of solid waste management. New York: MacGraw-Hill. 950 pp.

Themelis, N. J., Ulloa, P. A. (2007). Methane generations in landfills. – *Renewable Energy* 32 (7), pp 1243.1257

Tsibernaja, O. (2019). Uikala prügila metaanilagunduskatte uuring. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu. 47 lk.

Wagner, J.-F., Rettenberger, G., Reinert, P. (2007). Modern landfill technology – landfill behavior of mechanical-biological pre-treated waste. Proceedings Sardinia 2007, Elevent International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 1-5 October 2007

Zeiss, C.A. (2006). Accelerated methane oxidation cover system to reduce greenhouse gas emissions from MSW landfills in cold, semi-arid regions. – *Water, Air, and Soil Pollution* Vol 176, 285-306 pp.

LISAD

Lisa 1. Kattematerjali ja tuha sõelumise ja sortimise tulemused

Tabel 1.1. Koldetuha sõelumise ja sortimise tulemused

	> 8 mm			< 8 mm	
Liik	Kaal (g)	%	Liik	Kaal (g)	%
Klaas	276	5,97	Klaas	65	1,41
Keraamika	117	2,53	Kivi	64	1,39
Kivi	814	17,62	Metall	58	1,26
Tekstiil	3	0,06	Määramatu	3221	69,72
Kummiriba	1	0,02	kokku (g)	3408	73,77
Puit	1	0,02			
Kokku (g)	1212	26,23			

Tabel 1.2. Kattematerjali sõelumise ja sortimise tulemused

	> 8mm			< 8 mm	
Liik	Kaal g	%	Liik	Kaal g	%
Plast	4172	40,58761	Plast	69	0,67127152
Klaas	1591	15,47816	Klaas	116	1,12851445
Tekstiil	252	2,4516	Puit	25	0,24321432
Puit	215	2,091643	Mullataoline ülejääk	2074	20,17706
Kont	3	0,029186	kokku (g)	2284	22,2200603
Kivi	299	2,908843			
Keraamika	295	2,869929			
Elektroonika	175	1,7025			
Muu	149	1,449557			
Mullataoline ülejääk	844	8,210915			
kokku (g)	7995	77,77994			

Lisa 2. Gaasiseirekaevu K1 mõõtmistulemused

Tabel 2.1. Gaasiseirekaevu K1 mõõtmistulemused (%) (8 – kõige sügavamal, 1 – kõige kõrgemal)

Kaev 1 20.01.2021	8	7	6	5	4	3	2	1
CH ₄ (%)	63,8	64,1	64,5	64,2	64,2	63,8	58,9	51,2
CO ₂ (%)	40,4	39,7	39,8	39,5	39,8	39,4	38,3	37,0
O ₂ (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
H ₂ S (ppm)	>>>>	90,0	38,0	3,0	21,0	34,0	53,0	20,0
Bal (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	11,5
Temp. (C°)	38,4	37,4	36,3	35,8	36,2	38,3	40,5	38,0
Kaev 1 22.02.2021	8*	7	6	5	4	3	2	1
CH ₄ (%)	17,1	64,1	59,2	51,1	36,4	20,9	10,5	0,2
CO ₂ (%)	12,6	39,7	39,3	36,8	33	26,6	21,7	3,5
O ₂ (%)	15,8	0	0,1	0,1	0	0,3	3,2	18,4
H ₂ S (ppm)	>>>>	174	>>>>	1	12	3	2	4
Bal (%)	52,6	0	1,2	11,9	30,6	52,2	64,6	77,8
Temp. (C°)	36,7	37,4	32,4	28,3	26,5	25,6	17,9	16,7
Kaev 1 05.04.2021	8	7	6	5	4	3	2	1
CH ₄ (%)	62,7	63,3	63,9	63,9	59,1	44,7	10	0,1
CO ₂ (%)	40,3	39,7	39,2	39,7	38,2	33,3	22,4	9,2
O ₂ (%)	0,2	0,3	0	0,1	0,2	0,2	0,2	12,1
H ₂ S (ppm)	>>>>	200	154	2	19	59	170	0
Bal (%)	0	0	0	0	2,5	19,8	67,4	77,8
Temp. (C°)	37	37,4	38	38,4	42,8	42,4	36,7	31,3
Kaev 1 07.05.2021	8	7	6	5	4	3	2	1
CH ₄ (%)	60,8	62,5	59,4	46,1	39,6	30,3	35	0,5
CO ₂ (%)	39,4	39,2	39,7	38,7	38,4	35,2	32,8	0,9
O ₂ (%)	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	20,6
H ₂ S (ppm)	>>>>	>>>>	>>>>	9	34	200	119	>>>>
Bal (%)	0	0	0,7	14,8	21,7	34,3	31,7	78,2
Temp. (C°)	41	39,8	37,6	38	38,8	38,4	39,4	33,3

>>>> tulemus on alla aparaadi määramispiiri

*tärniga tähistatud mõõtetaseme number näitab ebakorrektselt mõõtmistulemust

Lisa 3. Gaasiseirekaevu K2 mõõtmistulemused

Tabel 3.1. Gaasiseirekaevu K2 mõõtmistulemused (%) (8 – kõige sügavamal, 1 – kõige kõrgemal)

Kaev 2 20.01.2021	8	7	6	5	4	3	2	1
CH ₄ (%)	61,8	60,7	60,8	61,5	61,6	62,0	64,5	0,2
CO ₂ (%)	42,8	43,2	43,2	42,8	42,6	42,0	39,7	2,1
O ₂ (%)	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,4	20,0
H ₂ S (ppm)	188,0	>>>>	100,0	3,0	7,0	>>>>	110,0	0,0
Bal (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	77,7
Temp. (C°)	44,0	41,1	38,8	37,0	36,5	37,6	42,7	44,0
Kaev 2 22.02.2021	8	7	6	5	4	3	2	1
CH ₄ (%)	62,1	61,6	61,4	61,8	61,9	61,4	38,5	0,1
CO ₂ (%)	42,4	43	42,9	42,6	41,8	39,4	32,3	0,9
O ₂ (%)	0	0	0	0	0	0	0,2	20,8
H ₂ S (ppm)	>>>>	163	53	17	11	>>>>	2	0
Bal (%)	0	0	0	0	0	0	29,2	78,2
Temp. (C°)	44,1	41,4	39,1	37,9	36,1	36,4	33,9	27,2
Kaev 2 05.04.2021	8*	7	6	5*	4	3	2	1
CH ₄ (%)	0,1	38,8	39	0,1	60,9	58,8	4,2	0,1
CO ₂ (%)	2,4	43,6	43,7	1,9	42,3	37,6	11,5	0,5
O ₂ (%)	20,4	0,2	0,2	20,5	0,1	0,2	12,5	20,4
H ₂ S (ppm)	4,1	>>>>	>>>>	2,3	10	>>>>	2	0
Bal (%)	77,3	0	0	76,4	0	33,3	71,7	79
Temp. (C°)	43,2	40,9	37,4	31,2	34,5	32,1	43	38,3
Kaev 2 07.05.2021	8	7	6	5	4	3	2	1
CH ₄ (%)	59,7	59,5	58,8	59,9	60,3	61,9	52,7	0,2
CO ₂ (%)	42,3	42,7	42,4	42,3	42,5	40,3	35,4	2,2
O ₂ (%)	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	17,1
H ₂ S (ppm)	>>>>>	>>>>>	>>>>>	67	11	183	>>>>>	1
Bal (%)	0	0	0	0	0	0	11,5	80,5
Temp. (C°)	44	41,2	34,5	39,6	39,6	41,6	48	42,7

>>>>> tulemus on alla aparaadi määramispiiri

*tärniga tähistatud mõõtetaseme number näitab ebakorrektselt mõõtmistulemust

Lisa 3 järg

Tabel 3.2. Gaasiseirekaevu K2 mõõtetaseme 1 kordusmõõtmine

Kaev 2 20.01.2021	1
CH ₄ (%)	17,9
CO ₂ (%)	8,0
O ₂ (%)	8,3
H ₂ S (ppm)	4,0
Bal (%)	65,6
Temp. (C°)	44,0

Lisa 4. Biokattega alalt ja avatud prügila pinnalt mõõdetud metaani sisaldus

Tabel 4.1. Biokattega alalt ja avatud prügila pinnalt mõõdetud metaani sisaldus (ppm)

CH ₄ kattekihi pinnalt (ppm)		19.08.2020	02.10.2020	21.10.2020	02.12.2020	09.12.2020	20.01.2021	22.02.2021	05.04.2021	07.05.2021
Rõngas 1	0	7,60	9,16	4,39	5,35	5,80	5,37	4,97	14,05	2,69
	10	7,99	12,80	4,56	6,13	17,77	5,44	5,21	12,93	4,23
	20	8,72	18,99	5,07	7,00	26,03	5,58	5,19	17,17	4,26
	30	9,24	23,58	5,97	7,71	32,86	5,58	9,91	13,45	4,48
Rõngas 2	0	5,37	73,69	15,10	17,92	11,88	5,09	12,20	5,77	4,74
	10	5,54	50,73	14,96	18,15	12,18	5,26	13,18	6,10	11,43
	20	5,62	33,37	14,93	18,29	12,23	5,47	14,15	6,28	10,10
	30	5,74	31,05	14,89	18,39	12,26	5,62	14,22	5,94	9,98
Rõngas 3	0						4,43	4,52	20,99	33,26
	10						4,34	7,34	16,81	33,10
	20						3,96	10,96	13,10	34,31
	30						4,10	11,79	18,43	33,22
Rõngas 4	0					659,11	1873,72	449,21	778,36	276,93
	10					4821,60	14075,07	47869,35	7054,45	3762,05
	20					9265,75	19264,01	85946,12	2845,19	7491,53
	30					14086,33	21111,99	109377,05	5260,01	11636,92
Rõngas 5	0							33,58	16,81	16,13
	10							24,30	12,58	25,83
	20							13,67	12,70	38,06
	30							14,04	11,78	63,33

Lisa 4 järg

Rõngas 6	0							16,74	15,53	342,82
	10							58,21	16,67	1999,54
	20							46,11	15,30	3115,63
	30							55,97	12,35	4088,55
Rõngas 7	0		15,16					1004,66	25,24	10,03
	10		62,09					17470,01	43,21	21,47
	20		56,50					6136,01	87,35	48,42
	30		58,28					13595,49	26,93	111,32

Lisa 5. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Lisett Lutsberg,

(sünnipäev 16.04.1997)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Metaanilagunduskatte uuring Jõelähtme prügilas“, mille juhendaja on Mait Kriipsalu,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 24.05.2021

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)